

Міністерство освіти і науки України  
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

**О. М. РАЧКОВСЬКИЙ,  
С. В. ОПТАСЮК,  
О. Г. ЧОРНА**

**ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА**  
**«АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА»**  
*(ТЕОРІЯ + ПРАКТИКА + ЕКСПЕРИМЕНТ)*

**НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ СТУДЕНТІВ  
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОГО ФАКУЛЬТЕТУ,  
СПЕЦІАЛЬНОСТІ: 014 СЕРЕДНЯ ОСВІТА (ФІЗИКА)**



*Електронне видання*

Кам'янець-Подільський

2023

УДК 539.1(075.8)

ББК 22.34я73

P27

*Рекомендувала вчена рада Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка (протокол № 1 від 26.01.2023 р.)*

### ***Рецензенти:***

***О. М. Павлюк***, кандидат педагогічних наук, викладач методист,  
голова циклової комісії природничо-математичних дисциплін  
Кам'янець-Подільського коледжу індустрії, бізнесу та інформаційних технологій;

***Р. М. Білик***, кандидат педагогічних наук, вчитель фізики вищої категорії  
Кам'янець-Подільського ліцею I-III ступенів «Славутичка» Хмельницької обласної ради;

***О. В. Слободянюк***, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук  
Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка

**Рачковський О. М., Оптасюк С. В., Чорна О. Г.**

**P27** **Загальна фізика «Атомна і ядерна фізика» (теорія + практика + експеримент):** навчально-методичний посібник для студентів фізико-математичного факультету, спеціальності: 014 Середня освіта (Фізика) [Електронний ресурс]. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2023. 150 с.

**Електронна версія доступна за покликаннями:**

URL: <http://elar.kpnu.edu.ua:8081/xmlui/handle/123456789/7135>

У першій частині посібника коротко висвітлено основні теоретичні відомості з загальної фізики, розділ «атомна і ядерна фізика». Друга частина містить тематику та плани практичних занять, приклади розв'язування задач до них та тестові завдання для контрольної перевірки знань.

В третій частині описані навчальні лабораторні роботи з курсу «Загальна фізика: атомної і ядерної фізики»

УДК 539.1(075.8)

ББК 22.34я73

© **О. М. Рачковський, С. В. Оптасюк,  
О. Г. Чорна, 2023**

---

## ЗМІСТ

---

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА</b> .....	8
<b>ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА</b> .....	38
<i>Плани практичних занять</i> .....	38
<i>Приклади розв'язування задач</i> .....	48
<i>Тематичні тестові завдання</i> .....	54
<b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА</b> .....	80
<i>Робота № 1. Визначення сталої в законі Стефана-Больцмана         за допомогою оптичного пірометра</i> .....	85
<i>Робота № 2. Дослідження вольт-амперної характеристики вакуумного         фотоелемента та визначення його інтегральної чутливості</i> .....	89
<i>Робота № 3. Визначення основних характеристик люмінесцентних ламп</i> .....	94
<i>Робота № 4. Вивчення поглинання <math>\gamma</math>-випромінювання в речовині</i> .....	99
<i>Робота № 5. Визначення фону космічної радіації         за допомогою лічильника Гейгера-Мюллера</i> .....	104
<i>Робота № 6. Перевірка співвідношення невизначеностей для фотонів</i> .....	113
<i>Робота № 7. Вивчення елементів захисту цінних паперів</i> .....	118
<i>Робота № 8. Вивчення основ радіаційної дозиметрії та практична         робота з вимірювання радіаційного фону дозиметром</i> .....	134
<b>САМОСТІЙНА РОБОТА</b> .....	142
<b>ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ</b> .....	143
<b>ДОВІДКОВІ ДАНІ</b> .....	146
<b>РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА</b> .....	149

---

## ВСТУП

---

Наприкінці XIX і на початку XX ст. було відкрито ряд фізичних явищ, що не пояснювались законами класичної фізики. У зв'язку з цим виникла необхідність створення нової фізичної теорії, яку назвали квантовою теорією матерії, або квантової фізикою.

Квантова фізика вивчає процеси, що відбуваються в мікросвіті – у світі молекул, атомів, атомних ядер, елементарних частинок. Оскільки властивості макроскопічних тіл зумовлені рухом і взаємодією їх складових – мікрочастинок, то закони квантової фізики дають змогу пояснити явища макросвіту.

Квантова фізика складається з квантової механіки, квантової статистики і квантової теорії поля.

Перший підготовчий крок до створення квантової механіки зробив М. Планк. Він для пояснення розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла висунув гіпотезу про те, що енергія атомів може змінюватися дискретними порціями – квантами. Пояснення експериментальних закономірностей зовнішнього фотоефекту на основі гіпотези світлових квантів дав А. Ейнштейн, а Н. Бор у 1913 р. використав ідею квантів і штучно введені постулати для пояснення станів водневоподібних атомів і розшифрування їхніх спектрів. У 1924 р. Л. де Бройль (1892-1987) висунув гіпотезу про корпускулярно-хвильовий дуалізм матеріальних частинок, основна ідея якої про хвильові властивості частинок була в 1927 р. підтверджена К. Девіссоном (1881-1958) і Л. Джермером (1896-1971).

Накопичення фактів привело до становлення в 1925-1928 рр. сучасної квантової механіки. У цей період В. Гейзенберг (1901-1976) розробив матричну теорію кінематики і динаміки мікрочастинок; Е. Шредінгер (1887-1961), спираючись на ідеї Л. де Бройля, у 1926 р. одержав диференціальне рівняння, яке є основним рівнянням квантової механіки; М. Борн у 1927 р. дав статистичну інтерпретацію квантово-механічного опису станів мікрочастинок або їх систем; П. Дірак (1902-1984) і В. Паулі (1900-1958) заклали основи релятиві-

стської квантової механіки. Тоді ж було сформульовано принцип невизначеності Гейзенберга та принцип Паулі.

У наступні роки великий вклад у розвиток квантової фізики внесли Х. Лондон (1907-1970), Е. Фермі (1901-1954), Р. Фейнман (н. 1918 р.) М. Гелл-Ман (н. 1929 р.), В. О. Фок (1898-1974), Л. Д. Ландау (1908-1968), І. Є. Тамм, Д. І. Блохінцев (1908-1979), М. М. Боголюбов (н. 1909 р.), Я. І. Френкель (1894-1952) та інші вчені.

Напівпровідникова і квантова електроніка, ядерна енергетика, навіть можливість здійснення в земних умовах реакції термоядерного синтезу зв'язані в кінцевому результаті з квантовими законами. Розвиток квантової фізики сприяє розумінню єдності світу та побудові його єдиної фізичної картини.

Особливість вивчення атомної і ядерної фізики у ЗВО полягає в тому, що студенти мають оволодіти системою вмінь і навичок, які б давали можливість ефективно передавати знання наступним поколінням, виховувати в них допитливість, інтерес до знань, любов до творчої праці. Вивчення теоретичного матеріалу супроводжується формуванням умінь їх застосування для аналізу та розрахунку простих задач атомної та ядерної фізики, а також виробленню навичок вимірювань за допомогою лабораторних приладів. Самостійна робота передбачає поглиблення теоретичних знань, аналіз сучасного стану використання атомних і ядерних явищ для практичних потреб людства й тренування у застосуванні теорій та моделей.

Основними завданнями вивчення дисципліни *«Атомна і ядерна фізика»* є ознайомити студентів з основними поняттями, явищами та законами, розглянути розвиток уявлень про будову атома та перехід від класичного до квантово-механічного опису атомних систем; розв'язати найпростіші одномірні задачі квантової механіки; на основі квантово-механічних уявлень розглянути рівні енергій та спектри атому водню і водневоподібних атомів, атомів лужних металів, багатоелектронних атомів; описати квантові властивості твердих тіл.; виробити вміння застосування теоретичних знань для аналізу і опису процесів, розрахунку або оцінки їх параметрів; виробити навички експериме-

нтальної реалізації окремих видів явищ та процесів, дослідження їх перебігу та перевірки основних законів; розвинути логічне мислення.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

**знати:**

- Основи математичних, загально-технічних і прикладних дисциплін, зокрема загальної і теоретичної фізики;
- Основні теоретичні питання, викладені у лекційному курсі, мати уявлення про будову атомів та явищ, обумовлених властивостями електронних оболонок;
- Вклад українських вчених у розвиток фізики;
- Питання охорони довкілля і раціонального використання природних ресурсів, вклад фізики у розвиток малозатратних, енергозберігаючих і безвідходних технологій виробництва;
- Навчальні плани, діючі шкільні програми, методика викладання фізики, вимоги до обладнання шкільних кабінетів фізики, шкільні підручники, методичні рекомендації, допоміжні засоби навчання та їх дидактичні можливості, методика організації та проведення позакласної і гурткової роботи;
- Питання охорони праці і техніки безпеки при роботі з обладнанням;
- Принципи роботи з джерелами знань: навчальною літературою, спеціальною науковою літературою, документами, довідниками, періодичною пресою;
- Основні принципи отримання, збору, аналізу, порівняння, систематизації і узагальнення інформації, фактів природних явищ і процесів, практику підготовки інформаційних і науково-методичних матеріалів;
- Способи обробки, аналізу та представлення результатів, отриманих в процесі виконання досліджень;
- Основні та найбільш вживані комп'ютерні мови і прикладні програми, аналізувати можливості їх використання у навчальному процесі.

**вміти:**

- Ефективно застосовувати теоретичні професійні знання у практичній діяльності;
- Вести спостереження, пояснити учням природні явища і процеси, здійснювати природоохоронну роботу;
- Використовувати навчально-лабораторне обладнання, технічні засоби навчання, електронно-обчислювальну техніку на різних видах занять і в позакласній роботі;
- Підготувати, здійснити постановку та проведення фізичних демонстрацій і лабораторних робіт, спостережень, забезпечити дотримання вимог техніки безпеки;
- Виконувати інсталяцію та налагодження роботи комп'ютерних програм;
- На практиці застосовувати знання з наукової організації і охорони праці;
- Брати активну участь в олімпіадах та конкурсах.

---

## ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

---

**Атомна фізика** вивчає властивості і будову електронної оболонки атома. Явища в цій області характеризуються рядом особливостей.

**Атомізм.** Будь-яка речовина складається з частинок – атомів, які в свою чергу, складаються з електронів, протонів, нейтронів. Електричний заряд також утворюється із елементарних зарядів, які дорівнюють  $1,59 \cdot 10^{-19}$  Кл кожен. Постійними носіями елементарного позитивного заряду являється протон і позитрон, носієм елементарного негативного заряду являється електрон. Кванти, або фотони, являються елементарними частинками електромагнітного поля (яке являє собою одну із форм існування матерії).

**Дискретність фізичних величин.** Більшість фізичних величин, які характеризуються рухом мікрочастинок в атома, змінюються дискретно, тобто стрибкоподібно. Сюди відноситься енергія, момент кількості руху та інші. Розміри цих стрибків різні, але у всіх випадках пов'язані з фундаментальною сталою – сталою Планка  $h$ , яка дорівнює  $6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с.

**Корпускулярно-хвильовий дуалізм.** Всі елементарні частинки та їх утворення володіють одночасно як корпускулярними, так і хвильовими властивостями («корпускула» означає частинка). Це відноситься власне як до частинок (електрони, позитрони, протони, нейтрони, ядра, атоми), так і до квантів, які одночасно можна розглядати як хвилі і як частинки. Згідно гіпотези Бройля, кожна мікрочастинка характеризується хвилею, довжина і частота якої пов'язані з імпульсом і енергією частинки співвідношенням

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}; \quad \nu = \frac{E}{h},$$

де  $p = mv$  – імпульс частинки.

Ця хвиля, яка називається хвилею де Бройля, не являється електромагнітною хвилею і не має аналога серед всіх видів хвиль, які вивчаються в класичній фізиці.



Якщо ввести так званий хвильовий вектор  $\vec{k}$ , модуль якого дорівнює  $2\pi / \lambda$ , і використати позначення  $\hbar = h / 2\pi$  та  $\omega = 2\pi\nu$ , то два вище наведені співвідношення можна записати в симетричній формі

$$E = \hbar\omega, \vec{p} = \hbar\vec{k}.$$

З другого боку, квантам електромагнітного випромінювання (фотонам) можна приписати масу та імпульс, так якщо б вони були частинками. Для них справедливе співвідношення

$$\lambda = \frac{h}{p_\phi} = \frac{h}{m_\phi c}; \nu = \frac{E}{h}.$$

Електромагнітна маса фотона  $m_\phi$ , яка входить у вище приведені співвідношення, обраховується за релятивістською формулою

$$m_\phi = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2},$$

а імпульс фотона  $p_\phi$  – за формулою

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

Якщо швидкість мікрочастинки близька до швидкості світла (ультра релятивістська частинка), то зв'язана з нею довжина хвилі знаходиться за релятивістською формулою

$$\lambda = \frac{h\sqrt{1-\beta^2}}{m_0\nu} = \frac{hc}{\sqrt{2E_k E_0 + E_k^2}} \approx \frac{hc}{E_k},$$

де  $\beta = v / c$ ;  $E_k$  – кінетична енергія частинки;  $E_0 = m_0 c^2$ .

**Постулати Бора.** Згідно спрощеної моделі атома Резерфорда–Бора атом складається з позитивно зарядженого ядра із зарядом  $Ze$  ( $Z$  – атомний номер), навколо якого по колових орбітах рухаються електрони. Кожний з електронів несе негативний заряд  $e$ . Для руху по колу електрон повинен мати прискорення. Це прискорення електрону повідомляє кулонівська сила взаємодії електрона з ядром:

$$m \frac{v^2}{r} = \chi \frac{Z_e e}{r^2}. \quad (*)$$

В цій формулі  $m$  – маса електрона;  $r$  – радіус орбіти;  $\chi = 1/4\pi\epsilon_0$ ,  $\epsilon_0$  – електрична стала.

Але прискорений рух зарядженої частинки є змінний струм (змінний струм – це рівномірний і прямолінійний рух зарядів). Змінний струм створює в просторі змінне електричне поле, на яке повинна витрачатися енергія електрона. Тому, з класичної точки зору, енергія електрона на орбіті повинна зменшуватися і він, в решті-решт, повинен впасти на ядро. В дійсності це не відбувається. Щоб узгодити цей факт (та інші факти, які з класичної позиції не пояснюються) з теорією, Бор ввів наступні, експериментально підтвердженні, факти:

1. Умова стаціонарності. Електрон в атомі може знаходитись тільки в деяких відповідних стійких станах, які називаються стаціонарними. Знаходячись в стаціонарних станах атом не випромінює (цим постулатом підтверджується невикористання класичної теорії).
2. Умова квантування. Із всіх можливих станів в атомі реалізуються тільки ті, для яких момент кількості руху електрона на орбіті (обертальний момент) рівний цілому числу сталих Планка  $h$ , які діляться на  $2\pi$ .

$$M = mrv = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar; n = 1, 2, 3, \dots \quad (**)$$

Тут  $h/2\pi = \hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Цікаво те, що при виконанні цієї умови довжина орбіти стає рівною  $2\pi r = nh/mv = n\lambda$ . Це означає, що вдовж борівської орбіти вкладається ціле число довжин хвиль електрона. Таким чином утворюються ніби стоячі хвилі.

3. Умова частот. Атом випромінює тільки при переході з одного дискретного стану в інший. Якщо позначити енергію атома в початковому стані через  $E_i$ , а в кінцевому  $E_f$ , то різниця енергій початкового і кінцевого станів буде випромінена у вигляді фотона з частотою  $\nu$ :

$$E_i - E_f = h\nu.$$

**Радіуси стаціонарних орбіт.** З формул (\*) і (\*\*) випливає:

$$r_n = \frac{r^2 m^2 v^2}{\chi Z e^2 m} = \frac{n^2 \hbar^2}{\chi Z e^2 m} = \frac{n^2 \hbar^2 \epsilon_0}{\pi m Z e^2},$$

тобто радіуси пропорційні квадрату цілого числа  $n$  і можуть приймати лише вибрані значення, кожне з яких відповідає певному значенню  $n$ . Іншими словами, радіуси орбіт квантовані.

**Енергія електрона в атомі.** Повна енергія електрона в атомі складається з кінетичної енергії  $E_k$  руху на орбіті і потенціальної енергії  $W$  кулонівської сили притягання до ядра. Потенціальна енергія електрона із зарядом  $e$  в полі ядра з зарядом  $Ze$  негативна, і її значення в точці, яка знаходиться на відстані  $r$  від ядра,

$$W = -\chi \frac{Ze \cdot e}{r} = -\chi \frac{Ze^2}{r}.$$

Кінетична енергія електрона на орбіті згідно (\*)

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{\chi}{2} \frac{Ze^2}{r}.$$

Повна енергія електрона на орбіті

$$E = E_k + W = -\frac{\chi}{2} \frac{Ze^2}{r} = -\frac{\chi^2 me^4 Z^2}{2\hbar^2 n^2} = -\frac{me^4 Z^2}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2},$$

тобто вона приймає тільки деякі дозволені значення, які залежать від цілого числа  $n$ . Таким чином, енергія електрона в атомі квантована.

Із зростанням  $n$  енергія зростає (її абсолютне значення зменшується). На великій відстані від ядра (математично, при  $r \rightarrow \infty$ ) енергія стає рівною нулю. Вона зображується (так само, як потенціальна енергія сили тяжіння) у вигляді потенціальної ями, але з такою різницею, що тут електрон може знаходитись на певних дискретних енергетичних рівнях (сходинах)  $E_1, E_2 \dots E_n \dots$ , в той час, як в гравітаційній потенціальній ямі тіло може знаходитися на будь-якому рівні.

Коли енергія електрона в атомі стає рівною нулю, електрон може вийти з атома (цей процес називається іонізацією атома). Для іонізації атома, тобто для вилучення електрона з «потенціальної ями», електрону необхідно надати енергію, рівну повній негативній енергії електрона в атомі:

$$E_{iон} = -E = \frac{\chi}{2} \frac{Ze^2}{r} = \frac{me^4 Z^2}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}.$$

**Збуджені атоми.** В стабільних атомах електрони знаходяться в найнижчих енергетичних станах. Якщо атому надати енергію, то електрон, отримуючи додаткову енергію, переходить на більш віддалену від ядра орбіту. Такий стан атома називається збудженим. Через малий проміжок часу  $\sim 10^{-8}$  с (існують атоми, які можуть залишатися довгий час у збудженому стані, вони називаються метастабільними) атом спонтанно повертається в основний стабільний стан, випускаючи при цьому фотон згідно вище наведеної умові частот.

**Спектр атома водню.** Сукупність енергетичних рівнів атома називається його спектром. Якщо атом водню переходить із  $k$ -го стану, який характеризується енергією  $E_k$ , в  $n$ -й стан, який характеризується енергією  $E_n$ , то при цьому випускається фотон з енергією

$$E_k - E_n = \frac{\chi^2 m e^4}{2\hbar^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \text{ (для водню } Z = 1).$$

Так як значення енергії випущеного кванта залежить від цілих чисел  $n$  і  $k$ , спектр атома буде складатися із окремих ліній, кожна з яких відповідає певній довжині хвилі (або частоти) випромінювання.

В спектроскопії прийнято характеризувати випромінювання так званими хвильовими числами  $\tilde{\nu}$ . Хвильове число показує, скільки довжин хвиль вкладається на відрізок довжиною  $1$  м, і вимірюється в  $\text{м}^{-1}$ . З цього визначення випливає, що

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}.$$

За допомогою хвильових чисел попередню формулу можна переписати у такому вигляді

$$\tilde{\nu} = \frac{E_k - E_n}{hc} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 \hbar^2 c} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Ця формула називається формулою Бальмера. Множник перед дужками називається сталою Рідберга, позначається  $R$  (або  $R_y$ ) і дорівнює  $1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ . Ця формула добре описує всі лінії спектра водню.

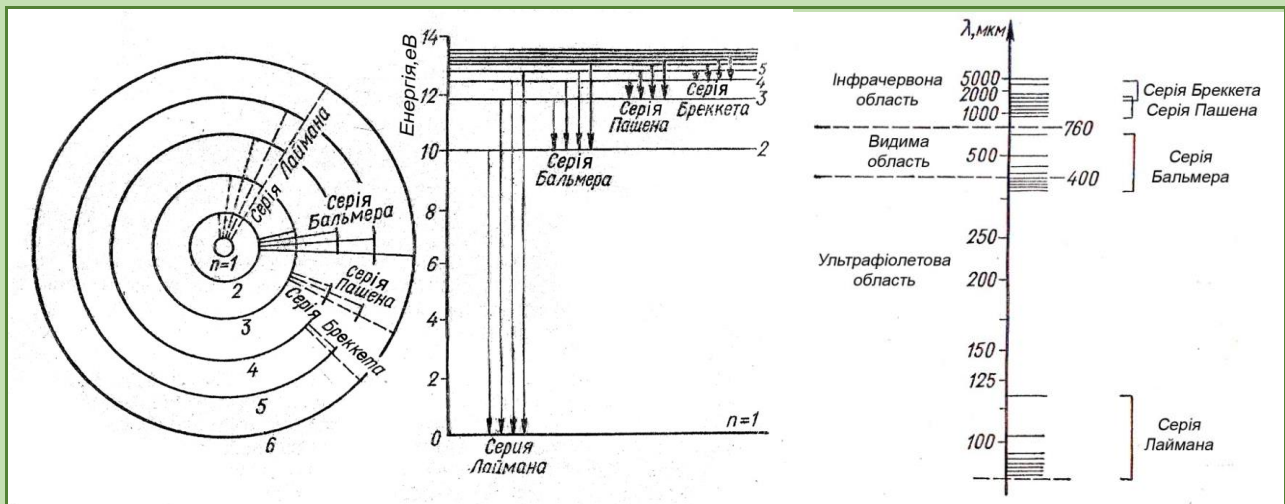


Рис. 1.

При переходах з зовнішніх орбіт на першу орбіту ( $n = 1, k = 2, 3, 4, \dots$ ) отримуємо серію ліній, яка називається серією Лаймана. При переходах на другу орбіту ( $n = 2, k = 3, 4, 5, \dots$ ), отримуємо серію Бальмера, при переходах на третю орбіту ( $n = 3, k = 4, 5, 6, \dots$ ) – серія Пашена і т.д.

На жаль теорія Бора не може описати ні основний стан атома водню, ні більш складні багатоелектронні атоми. Для цього створена квантова (хвильова) механіка.

**Квантові числа. Принцип Паулі.** Введене вище ціле число  $n$  характеризує енергетичний стан (рівень енергії) електрона в атомі і називається головним квантовим числом.

Кожному енергетичному стану електрона в атомі водню, який характеризується даним значенням головного квантового числа  $n$ , (крім випадку  $n = 1$ ), відповідає декілька підстанів, які мають одне і теж значення  $n$ , але відрізняються одне від одного значенням орбітального моменту кількості руху, яке належить даному підстану. Модуль цього орбітального моменту дорівнює  $\hbar\sqrt{l(l-1)}$ . Число  $l$  називається орбітальним квантовим числом і може приймати  $n$  значень від 0 до  $n - 1$ . Наприклад, для рівня з  $n = 1$  відповідає один підстан  $l = 0$ , рівневі з  $n = 5$  належить 5 підстанів із  $l = 0, 1, 2, 3, 4$  і т.д.

Якщо помістити атом в зовнішнє магнітне поле, то виявляється, що проекція орбітального моменту на напрям магнітного поля також квантується. Якщо орбітальне квантове число підсистеми дорівнює  $l$ , то цій підсистемі

можуть належати  $2l + 1$  різних проекцій орбітального моменту, які відрізняються один від одного на  $\hbar$ , а саме:  $l\hbar, (l-1)\hbar, \dots, 2\hbar, \hbar, 0, -\hbar, -2\hbar, \dots, -(l-1)\hbar, -l\hbar$ . Числа  $l, l-1, l-2, \dots, 0, \dots, -(l-2), -(l-1), -l$  називаються магнітними квантовими числами і позначаються  $m_l$ . Наприклад, підсистема з орбітальним квантовим числом  $l = 3$  в магнітному полі розпадається на  $2l + 1 = 7$  станів із значенням магнітного квантового числа  $m_l = 3; 2; 1; 0; -1; -2; -3$ . За відсутності магнітного поля всі ці сім станів зливаються в один.

Нарешті, вкажемо, що електрон має ще власний момент кількості руху (так якби він обертався навколо власної осі), який називається спіном (від англійського *spin* – веретено). Спін також квантується. Він може бути направлений або в ту ж сторону, куди і орбітальний момент, або в протилежну сторону. У зв'язку з цим спін може дорівнювати або  $\frac{1}{2}\hbar$ , або  $-\frac{1}{2}\hbar$ . Числа  $\frac{1}{2}$  та  $-\frac{1}{2}$  є значеннями спінового квантового числа, яке позначається буквою  $m_s$  і може приймати тільки ці два значення.

Таким чином, стан кожного електрона визначається чотирма квантовими числами  $n, l, m_l$  і  $m_s$ , причому:

$$\begin{aligned} n &= 1, 2, 3, \dots; \\ l &= 0, 1, 2, \dots; n - 1; \\ m_l &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l; \\ m_s &= \pm \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Повне число можливих станів в атомі водню для електрона з головним квантовим числом  $n$  дорівнює  $2n^2$ , як буде показано нижче. Всі ці стани знаходяться лише при енергетичному збудженні атома, при збудженні його зовнішніми полями або в багатоелектронних атомах, де деякі з цих станів (стаціонарні стани) частково заповнюються електронами.

**Виродження.** Той факт, що одному енергетичному рівневі належить декілька квантових станів, називається виродженням, а сам рівень називається виродженим. В розглянутому випадку одного атома кожен рівень з певним значенням головного квантового числа  $n$  являється  $2n^2$  – кратно виродженим. Найменше вироджений найнижчий стаціонарний рівень енергії із  $n = 1$ , так як

для нього  $l = n - 1 = 0$ ,  $m_l = 0$  і на ньому може знаходитися не більше 2-х електронів (із взаємно протилежними спінами, як це має місце в випадку атома гелію).

Стани з різними  $l$  часто позначаються не цифровими значеннями  $l$ , а початковими буквами англійських слів, які характеризують ту чи іншу спектральну серію ліній. Так, наприклад, стан з  $l = 0$  позначається  $s$  від англійського слова *sharp* – різкий (що характеризує різкість ліній спектральної серії). Група з трьох станів із  $l = 1$  позначається буквою  $p$  – від англійського слова *principal* (головна серія) і називається  $p$  – оболонкою. Група із п'яти станів з  $l = 2$  позначається буквою  $d$  від слова *diffuse* (розпливчасті лінії) і називається  $d$  – оболонкою і т.д.

При електронних переходах в зовнішніх оболонках випромінюються кванти інфрачервоного, видимого або ультрафіолетового світла; при переходах у внутрішніх оболонках, близьких до ядра, випромінюються кванти більш високої енергії (рентгенівські).

**Хвильова функція.** Вище вже згадувалося, що мікрочастинкам притаманний корпускулярно-хвильовий дуалізм. Зокрема експериментально знайдено, що електрони мають не тільки корпускулярні, але і хвильові властивості (дифракція, інтерференція, тунельний ефект). Розглядаючи стан рухомого електрона як хвильовий процес, можна уявити собі, що ця хвиля характеризується деякою величиною, яка є аналогічна до амплітуди звичайного хвильового процесу. Ця величина, часто позначається буквою  $\psi$ , називається хвильовою функцією. Подібно до амплітуди звичайного хвильового процесу вона може приймати як додатні так і від'ємні значення або дорівнювати нулю. На відміну від звичайної амплітуди вона може приймати також комплексні значення.

Хвильова функція  $\psi$  обчислюється за допомогою хвильового рівняння, знайденого Шредінгером і яке являється основним законом руху в квантовій механіці, аналогічно другому закону Ньютона в класичній механіці. Кожний можливий стан електрона в атомі, визначається квантовими числами  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$ ,  $m_s$ , описується хвильовою функцією  $\psi_{nlm_l m_s}$ .

**Фізична інтерпретація квадрату хвильової функції.** На відміну від класичної механіки і теорії Бора, які розглядають траєкторію мікрочастинки (наприклад, електрона) як певну лінію, на які можна точно знайти координату і імпульс електрона, квантова механіка може лише вказувати, наскільки імовірно місцезнаходження електрона в деякому малому об'ємі  $\Delta V$ , який знаходиться в тому чи іншому місці атома. Виходить, що ймовірність знаходження електрона в об'ємі  $\Delta V$  виражається похідною  $\psi^2 \Delta V$ . Поділивши цей вираз на  $\Delta V$ , ми знайдемо, що величину  $\psi^2$  можна розглядати як густину ймовірності знаходження електрона в даній частині простору. (Якщо  $\psi$  – комплексна величина, то під її квадратом розуміють квадрат її модуля  $|\psi|^2$ , який завжди є дійсним додатнім числом).

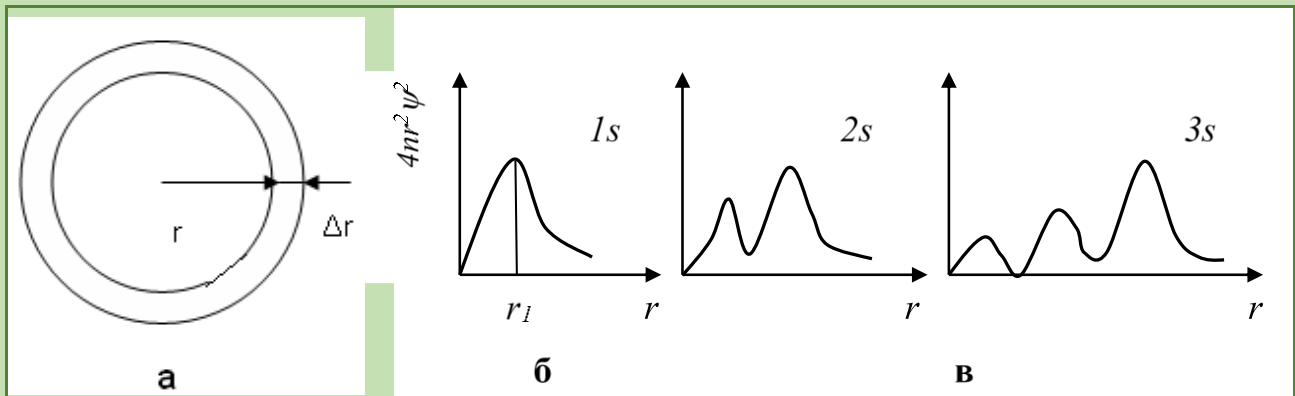


Рис. 2.

Якщо хвильова функція  $\psi$  змінюється з часом, то змінюється і ймовірність знаходження електрона в тій чи іншій частині простору. Структура ж самого електрона при цьому зовсім не змінюється і його можна в багатьох випадках розглядати як точковий заряд.

**Фізична суть борівських орбіт і квантових чисел.** Ймовірність знаходження електрона змінюється в залежності від радіуса атома. Розглянемо головний (не збуджений) стан атома водню, який відповідає квантовим числам  $n = 1, l = 0$  тобто  $1s$  – стан. Виділимо в атомі тонкий сферичний шар (рис. а), який знаходиться між сферами з радіусами  $r$  та  $r + \Delta r$ ,  $\Delta r$  – де мала величина. Об'єм цього шару дорівнює  $\Delta V = 4\pi r^2 \Delta r$ . Ймовірність знаходження електрона в шарі пропорційна  $4\pi r^2 \psi^2$ , і її залежність від радіуса зображена на (рис.



б) має максимум. Виходить, що цей максимум розташований на відстані  $r_1 = 529 \text{ нм}$  від центру, тобто співпадає з радіусом першої борівської орбіти. Таким чином, на відміну від теорії Бора, згідно якої електрон знаходиться на відстані  $r_1$  від ядра, квантова механіка стверджує, що на цій відстані існує лише найбільша ймовірність знаходження електрона.

Такий просторовий розподіл ймовірності, густина якого максимальна в районі борівської орбіти, ми будемо надалі називати «електронною хмарою».

Для  $1s$ -стану електронна хмара сферично симетрична. Сферично симетричними являються також і всі інші  $s$ -стани, які належать енергетичним рівням  $n = 2, 3 \dots$ , тобто  $2s, 3s \dots$  стани, так як в цих станах орбітальний момент кількості руху відсутній і орбітальне квантове число  $l = 0$ . Як видно з рис. в, ймовірності знаходження електрона в цих станах мають відповідно 2, 3 і більше максимумів.

Якщо орбітальне квантове число  $l \neq 0$ , то електронні хмари втрачають сферичну симетрію і набувають форму розмитих еліпсів різних конфігурацій.

Крім то, як вище згадувалось, кожному значенню  $l$  належить ще  $2l + 1$  магнітних квантових чисел  $m_l$ . Від цих чисел залежать орієнтації еліпсів у просторі.

Таким чином, квантові числа  $n, l$  та  $m_l$  характеризують відповідно розмір, форму і просторову орієнтацію електронних хмар.

Нарешті, спінове квантове число  $m_s$ , яке приймає всього два значення ( $\pm \frac{1}{2}$ ), характеризує паралельну і антипаралельну орієнтації спіну електрона по відношенню до орбітального моменту.

**Багатоелектронні атоми. Принцип Паулі.** Як зазначалось вище, кожний енергетичний стан електрона в атомі характеризується чотирма квантовими числами  $n, l, m_l$  і  $m_s$ , тобто хвильовою функцією  $\psi_{nlm,m_s}$ . Виявляється, що в атомі не може бути двох електронів, в яких були б однакові значення всіх чотирьох квантових чисел. Іншими словами, однакові хвильові функції не можуть локалізуватися в одній і тій самій області простору. Це твердження називається принципом Паулі.

Користуючись принцип Паулі, можна підрахувати, яке максимальне число електронів може знаходитися на різних енергетичних рівнях і підрівнях в атомі.

Очевидно, що число електронів в атомі, які мають три однакових квантових числа  $n$ ,  $l$  та  $m_l$ , дорівнює двом, так як четверте квантове число  $m_s$  може мати тільки два значення  $+1/2$  та  $-1/2$ .

Число електронів в атомі, які мають два однакових квантових числа  $n$  і  $l$ , але різне  $m_l$ , знаходиться так: при даному значенні  $l$  квантове число  $m_l$  може мати  $2l + 1$  різних значень. Враховуючи ще два можливих значення числа  $m_s$ , знайдемо, що в атомі може одночасно бути  $2(2l + 1)$  електронів з однаковим квантовими числами  $n$  і  $l$ . Іншими словами,  $s$ -електронів ( $l = 0$ ) може бути тільки  $2(2 \cdot 0 + 1) = 2$ ,  $p$ -електронів ( $l = 1$ ) може бути  $2(2 \cdot 1 + 1) = 6$ ,  $d$ -електронів ( $l = 3$ ) може бути 10 і т.д.

Число атомних електронів, які мають одне і те ж головне квантове число  $n$ , а всі інші квантові числа – різні, визначається, виходячи з того, що при даному значенні числа  $n$  число  $l$  може приймати  $n$  значень:  $0, 1, 2, \dots, n - 1$ . Так як кожному значенню  $l$  відповідає  $2(2l + 1)$  електронів, повне число електронів з однаковим  $n$  дорівнює:

$$\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l + 1) = 2[1 + 3 + 5 + \dots + (n - 1)] = 2n^2.$$

Звідси видно, що для головного квантового числа  $n = 1$  максимальне число електронів в атомі дорівнює 2, для  $n = 2$  воно рівне 8, для  $n = 3$  рівне 18 і т.д.

Сукупність електронів, які мають одне і те ж головне квантове число  $n$ , називається шаром і позначається прописними буквами (рахуючи від ядра): шар з  $n = 1$  називається  $K$ -шаром, шар з  $n = 2$  називається  $L$ -шаром. Далі йдуть  $M, N, O$ -шари і т.д.

Сукупність електронів, які мають однакові квантові числа  $n$  і  $l$ , називається оболонкою.

В оболонці електрони розподіленні по підоболонках, кожна з яких відповідає певному значенню орбітального квантового числа  $l$  ( $s$ -,  $p$ -,... підоболонки). Сказане вище ілюструється за допомогою таблиці.

**Принцип побудови системи елементів Д. І. Менделєєва.** Найбільш стійкий стан електрона в атомі – це стан з мінімальною енергією. Тому електрону будову незбудженого атома водню, який має 1 електрон ( $Z = 1$ ), можна записати як  $1s^1$ , де число зліва означає головне квантове число, буква  $s$  відповідає  $l = 0$  і показник означає число електронів, які зв'язані в даному стані.

В наступному по порядку атомі гелію ( $Z = 2$ ) другий електрон також знаходиться на рівні  $1s$ , але має протилежно напрямлений спіні. Електронна структура гелію записується як  $1s^2$ . Цими двома елементами заповнюється найближчий до ядра  $K$ -шар і цим самим завершується побудову першого періоду системи елементів.

В літію ( $Z = 3$ ) перші 2 електрони заповнюють  $K$ -шар, а третій електрон розташовується на нижчому рівні  $2s$   $L$ -шару. Електронна структура літію записується як  $1s^2 2s^1$ . Структура берилію ( $Z = 4$ ) записується  $1s^2 2s^2$ , структура бора ( $Z = 5$ )  $1s^2 2s^2 2p^1$  і т.д. до неону ( $Z = 10$ ), структура якого має вигляд  $1s^2 2s^2 2p^6$ . Цим елементом завершується  $L$ -шар.  $M$ -шар починається з натрію ( $Z = 11$ ) з електронною структурою  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$  і закінчується аргоном ( $Z = 18$ ), який має структуру  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ .

## Розподіл електронів в атомі по шарах і оболонкам

Шар	Оболонка	Квантові числа				Максимальне число електронів	
		$n$	$l$	$m_l$	$m_s$	В оболонці	В шарі
<i>K</i>	<i>1s</i>	1	0	0	$\pm 1/2$	2	2
<i>L</i>	<i>2p</i>	2	0	0	$\pm 1/2$	2	8
	<i>2p</i>		-1	$\pm 1/2$	6		
			1	0		$\pm 1/2$	
<i>M</i>	<i>3s</i>	3	0	0	$\pm 1/2$	2	18
	<i>3p</i>		1	0	$\pm 1/2$	6	
			-1	$\pm 1/2$			
			+1	$\pm 1/2$			
	<i>3d</i>		2	0	$\pm 1/2$	10	
-1		$\pm 1/2$					
+1		$\pm 1/2$					
+2		$\pm 1/2$					
<i>N</i>	<i>4s</i>	4	0	0	$\pm 1/2$	2	32
	<i>4p</i>		1	0	$\pm 1/2$	6	
			-1	$\pm 1/2$			
			+1	$\pm 1/2$			
	<i>4d</i>		2	0	$\pm 1/2$	10	
			-1	$\pm 1/2$			
			+1	$\pm 1/2$			
			+2	$\pm 1/2$			
			-3	$\pm 1/2$			
<i>4f</i>	3	0	$\pm 1/2$	14			
	-1	$\pm 1/2$					
	+1	$\pm 1/2$					
	+2	$\pm 1/2$					
	-2	$\pm 1/2$					
	-3	$\pm 1/2$					

				+3	$\pm 1/2$		
--	--	--	--	----	-----------	--	--

Подальше заповнення електронних рівнів дещо відхиляється від вище описаної простої схеми, тому що в багатоелектронних атомах зовнішні електрони не тільки притягуються до ядра, але і відштовхуються електронами які близько розташовані до ядра, тобто останні екранують зовнішні електрони від ядра. Це екранування виявляється не однакоим для електронів з різними значеннями орбітального квантового числа  $l$ . Таким чином, порядок заповнення електронних станів в багатоелектронних атомах залежить не тільки від  $n$ , але і від  $l$  і тому дещо порушується. Порушення ці тим більші, чим далі розташовані електрони від ядра, тобто чим сильніший екрануючий ефект.

**Принцип невизначеності.** Згідно квантово-механічним уявленням одні і ті ж мікрооб'єкти в одних випадках поведуть себе як частинки, а в інших, – як хвилі. Деякі властивості мікрочастинок взагалі не можуть бути описані ні корпускулярною, ні хвильовою картинами, а потребують введення нових понять.

В класичній фізиці всяке макроскопічне тіло, яке рухається вздовж осі  $X$ , в будь-який момент часу займає певне місце (під місцем розуміють координату  $x$  центра тяжіння) і має певний імпульс  $p_x = mv_x$ .

У випадку мікрочастинок, які мають хвильові властивості, такий опис стану частинок виявляється неможливим. Дійсно, нехай координата  $x$  мікрочастинки визначена з точністю до  $\Delta x$ , тобто частинка знаходиться десь між  $x$  і  $x + \Delta x$ . Тоді хвильова функція, яка описує частинку, відмінна від нуля тільки на відрізку, який приблизно дорівнює  $\Delta x$ , і тому обмежена у просторі. Можна показати, що всяка обмежена хвиля не є гармонічною, а являє собою результат накладання (суперпозиції) нескінченно великого числа різних синусоїдальних хвиль, які завдяки інтерференції взаємно гасяться на всьому просторі, крім ділянки  $\Delta x$ , утворюючи на цій ділянці так званий хвильовий пакет. Такий хвильовий пакет має не одну певну довжину хвилі  $\lambda$  (і, відповідно певний імпульс  $p$ ), а набором імпульсів, що знаходяться на проміжку від  $p_x$  до  $p_x + \Delta p_x$ . Співвідношення невизначеності, вперше знайдене Гейзенбергом, стверджує що

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$$

і, відповідно, для руху вздовж осей  $Y$  та  $Z$ ,

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq h; \Delta z \cdot \Delta p_z \geq h,$$

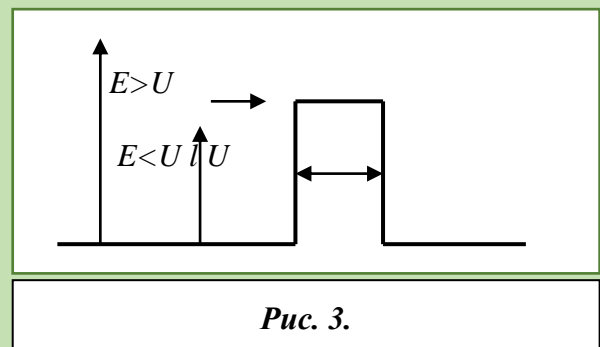
де  $h$  – стала Планка.

З цих співвідношень видно, що чим менше  $\Delta x$ , тобто чим точніше знаходиться координата частинки, тим більше  $\Delta p_x$ , тобто тим більш невизначеним стає імпульс частинки. Справедливе і обернене твердження: якби можна було точно знайти швидкість частинки ( $\Delta p_x \rightarrow 0$ ), то це означало б, що координату частинки зовсім знайти неможливо, так як в цьому випадку  $\Delta x \rightarrow \infty$  і місце знаходження частинки можна було б чекати в будь-якій точці простору. Так як, в силу співвідношення невизначеностей,  $\Delta x$  і  $\Delta p_x$  не можуть одночасно дорівнювати нулю, то звідси випливає, що в мікрочастинки принципово не можна одночасно знайти точні значення координати та імпульсу.

Подібні співвідношення невизначеності існують і між іншими парами фізичних величин, які відносяться до мікрочастинок. Наприклад, якщо мікрочастинка протягом часу  $\Delta t$  знаходиться в нестационарному стані (скажемо, на збудженому рівні), то енергія  $E$  цього стану може бути визначена лише з точністю до  $\Delta E$ , так як

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h.$$

Звідси, випливає як наслідок, 1-й постулат Бора: якщо частинка знаходиться в стані з точним значенням енергії  $E$  ( $\Delta E = 0$ ), то вона буде знаходитися в цьому стані нескінченно довгий час, так як в цьому випадку  $\Delta t \rightarrow \infty$ . Це і буде стаціонарний стан.



**Проходження мікрочастинки через потенціальний бар'єр (тунельний ефект).** Якщо ми маємо дві області простору, в яких потенціальна енергія менша, ніж на поверхні, що розділяє ці області, ми говоримо, що області розділені потенціальним бар'єром висотою  $U$ .

Нехай мікрочастинка масою  $m$ , повна енергія якої дорівнює  $E$ , рухається зліва направо до потенціального бар'єру, який для спрощення береться прямокутним. Згідно квантової механіки на границі двох областей, де має місце скачок потенціалу, дебройлівська хвиля мікрочастинки частково відбивається, а частково попадає всередину другої області, подібно до світлової хвилі на границі двох середовищ з різними показниками заломлення. Позначимо співвідношення інтенсивності відбитих частинок до інтенсивності падаючих через  $R$ , а відношення інтенсивності частинок які проходять до інтенсивності падаючих – через  $D$ . Величина  $R$  називається коефіцієнтом відбивання, а  $D$  – коефіцієнтом прозорості (або просто прозорістю) бар'єра. Очевидно, що  $R + D = 1$ .

З точки зору класичної механіки при  $E > U$  повинно мати місце повне проходження:  $R = 0$ ,  $D = 1$ , тобто бар'єр повинен бути повністю прозорим. Але для мікрочастинок це не так, і навіть при  $E > U$  має місце часткове відбивання так само як це відбувається з світловими хвилями на границі двох середовищ.

При  $E < U$  з точки зору класичної механіки бар'єр непрозорий і повинно відбуватися повне відбивання:  $D = 0$ ,  $R = 1$ . Згідно квантової теорії і тут деяка доля частинок проходить крізь бар'єр на другу область, так, що  $D \neq 0$ . Це явище називається тунельним ефектом. Для прямокутного потенціального бар'єру шириною  $l$

$$D = D_0 e^{-\frac{2l}{h} \sqrt{2m(U-E)}}$$

де  $D_0$  – множник, близький до 1.

Наприклад, якщо  $U - E \approx 1 \text{ eV}$ ,  $m \approx 10^{-30} \text{ кг}$  (маса електрона) і  $l = 10^{-10} \text{ м}$ , то  $D = e^{-1,045} = 0,29$ . Якщо ж взяти  $l = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ , то  $D \approx e^{-562} = 0,005$ ; при  $l = 10^{-9} \text{ м}$ ,  $D = e^{-10,45} = 4,54 \cdot 10^{-8}$ .

Тунельний ефект можна спостерігати при радіоактивному розпаді, в явищах холодної емісії електронів, в електронній структурі твердого тіла та ін.

***Мікрочастинка в одномірній прямокутній потенціальній ямі.***

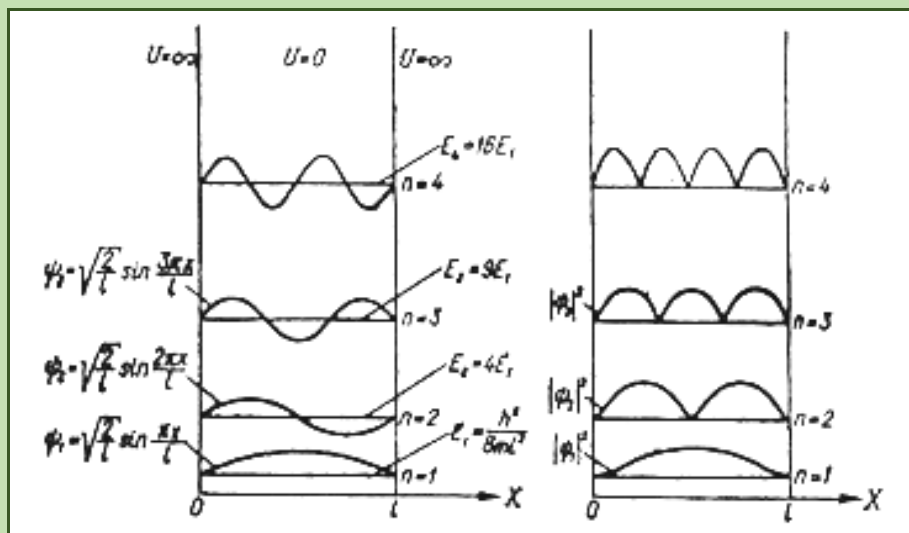


Рис. 4.

Нехай мікрочастинка вільно рухається в межах потенціальної ями шириною  $l$ , обмеженої повністю відбиваючими нескінченно високим потенціальними стінками. На проміжку  $0 < x < l$  потенціал  $U = 0$ , а в точках  $x = 0$  і  $x = l$   $U = \infty$ . В такій ямі падаюча і відбита дебройлівські хвилі, зв'язані з мікрочастинкою, утворюють стоячу хвилю. Довжина  $\lambda$  цієї хвилі така, що на ширині ями  $l$  вкладається ціле число  $n$  півхвиль, так що  $\lambda_n = \frac{2l}{n}$ , де  $n = 1, 2, 3, \dots$ . При цьому в точках  $x = 0$  і  $x = l$  завжди розташовані вузли.

Енергія мікрочастинки, яка рухається в такій ямі,

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda_n^2} = \frac{n^2 h^2}{8ml^2}.$$

Очевидно, що енергія приймає тільки деякі дозволені значення, які пропорційні квадрату цілого числа  $n$ , тобто енергія частинки квантована. Спектр енергій частинки в прямокутній ямі з нескінченно високими стінками також показано на рисунку.

Ймовірність знайти частинку в тому чи іншому місці потенціальної ями виражається виразом  $\sin^2 \frac{\pi nx}{l}$  (отриманим шляхом розв'язання рівняння Шредінгера), яке графічно зображено на тому ж малюнку для  $n = 1, 2, 3, 4$ . Як видно з малюнка, в найнижчому енергетичному стані ( $n = 1$ ), частинку можна знайти з найбільшою ймовірністю в середині ями (в той час як з класичної точки зору всі місця знаходження частинки рівноймовірні). При збільшенні енергії частинки



(тобто при збільшенні  $n$ ) кількість дискретних максимумів ймовірності зростає, і при дуже великих  $n$  максимумами практично зливаються і частинку з рівною ймовірністю можна знайти в будь-якому місці ями, що відповідає макроскопічній картинці.

**Модель вільних електронів в металах.** Згідно цієї моделі в металі рівномірно розподілений газ, які складається з вільних електронів, здатних переміщатися по всьому об'єму і які мають однакову потенціальну енергію –  $U_0$ . Виходу електронів з металу перешкоджає потенціальний стрибок на його поверхні, який називається роботою виходу  $\omega$ .

Ця проста модель дозволяє пояснити багато електричних, магнітних і теплових властивостей твердих тіл.

**Елементарні комірки. Розподіл Фермі–Дірака.** Згідно квантової механіки імпульси електронів повинні відрізнятися один від одного хоча б на  $\Delta p$ . Цю величину можна знайти з співвідношень невизначеностей, припустивши, що кристал має форму куба з ребром  $L$  і що невизначеність розташування електрона вздовж будь-якої осі рівна розміру  $L$  кристала в напрямі тієї ж осі:

$$\Delta p_x = \Delta p_y = \Delta p_z = \frac{h}{L}.$$

Введемо систему координат, де в якості осей взято складові радіус-вектора імпульса електрона  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $p_z$  (так званий простір імпульсів). Мінімальна невизначеність імпульсу електрона рівна об'єму елементарної комірки в тривимірному просторі імпульсу

$$\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z = \frac{h^3}{L^3} = \frac{h^3}{V}.$$

Кожній комірці відповідає деякий квантовий стан, тобто кінець кожного радіус-вектора імпульса знаходиться всередині елементарної комірки, і вона може вмістити не більше двох електронів з протилежними спінами. Весь об'єм  $V$  розбивається на такі елементарні комірки і їх число визначає всі можливі стани електронів. Ймовірність заповнення цих комірок електронами називається функцією розподілу  $f_F$  Фермі–Дірака. Для заповнених комірок  $f_F = 1$ , для порожніх  $f_F = 0$ . Квантова статистика дає для  $f_F$  вираз

$$f_F = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1},$$

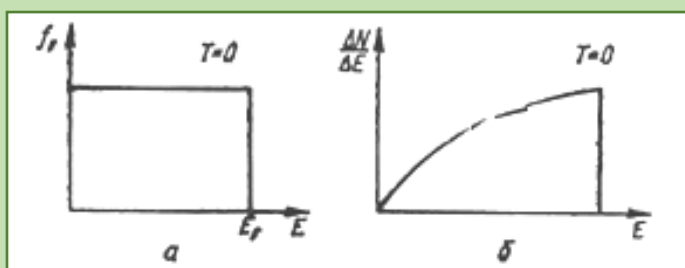


Рис. 5.

графічно зображений на рис. а. Тут  $E$  – енергія, яка відповідає заповненій комірниці,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура,  $E_F$  – так звана енергія Фермі, яка рівна енергії найвищого

заповнення стану при абсолютному нулі (тобто максимальна енергія вільних електронів при  $T = 0$ ). Якщо число вільних електронів в металі –  $N$ , то оскільки на кожному рівні може знаходитися по 2 електрони, при  $T = 0$  заповнено всього  $N/2$  рівнів, верхній з яких являється рівнем Фермі, а всі які лежать вище стани вільні. Геометричний образ поверхні рівня Фермі для вільних електронів в імпульсному просторі – це сфера радіуса  $r$ . На її поверхні лежать кінці радіус-векторів імпульсів двох електронів максимальної енергії, а імпульси всіх інших електронів знаходяться всередині сфери. Можна показати, що

$$p_F = h \left( \frac{3n}{8\pi} \right)^{1/3}; \quad E_F = \frac{h^2}{2m} \left( \frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3}$$

( $n$  – концентрація вільних електронів).

Що стосується розподілу по енергіях, то число вільних електронів в одиниці об'єму, енергія яких лежить в проміжках між  $E$  та  $E + \Delta E$ , зображене на рис. б, і рівне

$$\Delta N = \frac{4\pi}{h^3} \frac{\sqrt{2mEE}}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}.$$

**Виродження електронного газу.** Для електронного газу  $n \approx 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ,  $m \approx 10^{-30} \text{ кг}$ . При цьому  $E_F \approx 10 \text{ eV}$ . Молекули звичайного газу мали б таку енергію при  $T \approx 10^5 \text{ K}$ , тобто при температурі, коли існування твердого тіла неможливе. Газ, властивості якого різко відрізняється від властивостей звичайного газу, називається виродженим.

**Розподіл Максвелла-Больцмана. Температура виродження.** У випадку звичайного газу, який складається з молекул з масою  $m \geq 10^{-27} \text{ кг}$  із концент-

рацією  $n \leq 10^{27} \text{ м}^{-3}$  при температурах, які перевищують деяку температуру виродження  $T_k$ , виконується рівність

$$e^{(E-E_F)/kT} \gg 1$$

При цьому виродження знімається і функція  $f$  приймає форму

$$f_M = e^{\frac{E_F - E}{kT}} = A e^{-\frac{E}{kT}}$$

(рис. а), що називають класичним розподілом Максвелла-Больцмана. Розподіл молекул за енергіями відповідно також змінюється (рис. б). Ці класичні розподіли справедливі для звичайних молекулярних ідеальних газів при температурах

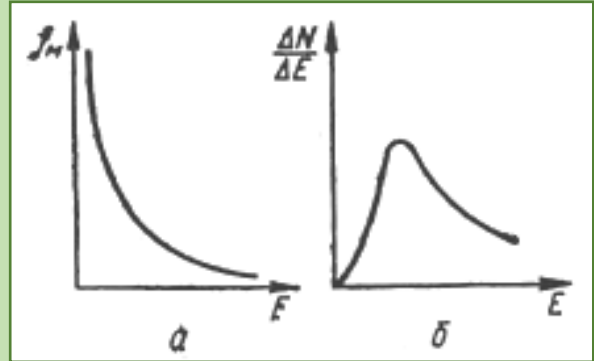


Рис. 6.

вищих за температуру виродження  $T_k$ . для більшості звичайних газів  $T_k \approx h^2 n^{2/3} / km$  і настільки низька, що квантові властивості не встигають проявитися, оскільки газ ще до досягнення цієї температури перетворюється в рідину.

У напівпровідникових концентрація електронного газу складає  $10^{18} \div 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Тому він в більшості випадків являється неvirодженим і підпорядковується класичній статистиці Максвелла-Больцмана.

**Вплив температури на розподіл електронів.** Коли температура металу стає вище  $0 \text{ К}$ , то електрони можуть піддатися тепловому збудженню і перейти на вільні рівні вищі рівня Фермі. Якщо виконується умова  $kT \ll E_F$ , то збуджуються лише електрони вузької смуги шириною порядку  $kT$ , які безпосередньо прилягають до рівня Фермі, а електрони більш глибоких рівнів залишаються незачепленими. В цій смугі на місці електронів які вийшли з'являються вільні стани – так звані дірки, які поводять себе, як носії позитивних зарядів.

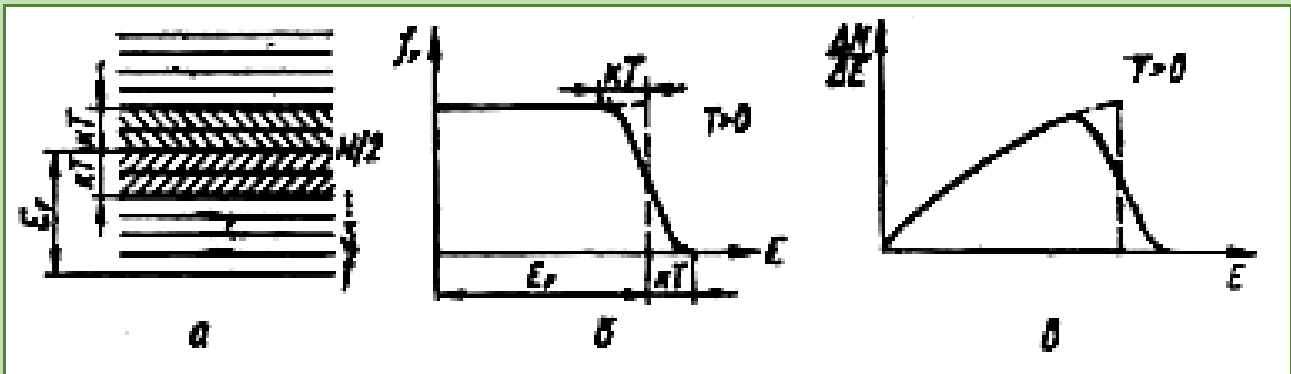


Рис. 7.

З рис. а видно, що при тепловому збудженні електрони залишають смугу з енергією  $E < E_F$  і переходять на смугу вище рівня Фермі  $E_F$ . Обидві смуги однакової ширини, так як виражають одне і теж число електронів. Це число приблизно рівне  $kTN / 2E_F = \Delta N$ . При кімнатній температурі  $kT \approx 0,025 \text{ eV}$ ,  $E_F = 3 \div 10 \text{ eV}$ , так що  $\Delta N / N \approx 0,01$ . Інакше кажучи, під теплове збудження попадає лише незначна частина електронів поблизу рівня Фермі, так що стан електронного газу, в тому числі і розміщення рівня Фермі, в цілому майже не залежить від температури.

**Контактна різниця потенціалів.** Якщо зробити так, щоб два метали різної природи (наприклад, мідь і цинк) дотикалися, то між ними виникне різниця потенціалів, яка називається контактною різницею. Для цього необхідно, щоб метали мали потенціальні ями різної глибини і різні роботи виходу  $\omega_1$  і  $\omega_2$ . Для визначеності припустимо, що  $\omega_1 < \omega_2$ .

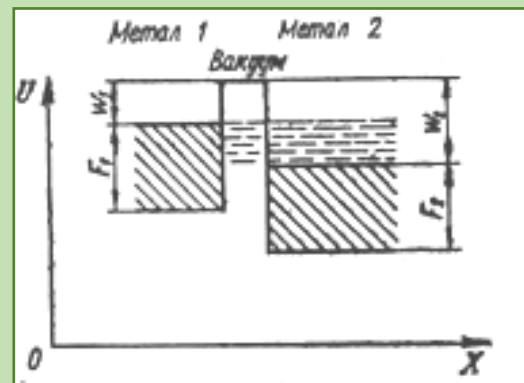


Рис. 8.

Тоді рівень Фермі в металі 1 буде вище відносно нульового рівня  $0X$ , чим рівень Фермі в металі 2. Внаслідок цього буде відбуватися тунельний перехід електронів з металу 1 на вільні рівні металу 2. При цьому метал 2 буде заряджатись негативно, а метал 1 – позитивно. Цей процес буде продовжуватися до того часу, поки верхні заповнені рівні (тобто рівні Фермі) обох металів не зрівняються. В результаті між обома металами встановиться зовнішня різниця потенціалів, яка рівна  $(\omega_2 - \omega_1)/e$ , де  $e$  – заряд електрона.

**Зонна теорія твердого тіла.** В твердому тілі відстані між атомами настільки малі, що кожен з них знаходиться під впливом електромагнітного поля сусідніх атомів. При цьому рівні енергії кожного атома дещо зміщуються відносно свого початкового стану і кожен з них розщеплюється на  $2l + 1$  підрівнів. На кожному такому підрівні може знаходитися по 2 електрони із протилежними спінами.

Крім цього, якщо в даній системі (кристалі) існує  $N$  однакових атомів, то кожен з рівнів атома повторюється  $N$  раз. Однак, оскільки у близько розташованих атомів рівні зміщуються, кристал буде містити  $N$  близько прилягаючих один до одного підрівнів, кожен з яких  $(2l+1)$ -кратно вироджений. Таким чином, кожен з рівнів ізолюваного атома дає в кристалі сукупність  $(2l+1)N$  підрівнів, відстань між якими  $\approx 10^{-22} eV$ .

Нарешті, завдяки тунельному ефекту, який дозволяє зовнішнім електронам близько розташованих атомів мігрувати від атома до атома, зменшується степінь локалізації (тобто час перебування  $\Delta t$ ) електронів на певних атомах. Внаслідок співвідношення невизначеностей ширина рівнів  $\Delta E$  зростає, вони перекриваються між собою, і електрони наче об'єднуються, утворюючи електронний газ.



Рис. 9.

За всіма цими причинами рівні енергії ізолюваних атомів, при об'єднанні останніх в кристали, перетворюються в суцільні смуги, або зони, шириною порядку електронвольт.

Все вище сказане відноситься переважно до валентних електронів. Стан електронів внутрішніх оболонок атома майже не змінюється.

Енергетичні зони можуть бути віддалені одна від одної зонами заборонених енергій, ширина яких виявляє характер даного кристалу (див. нижче). Так як кожна зона має обмежене число рівнів, то в ній може розміщуватися лише обмежене число електронів. Відсутність одного з електронів в заповненій зоні, тобто «дірка», сприймається як наявність одиничного позитивного заряду, який здатний переміщуватися під дією зовнішнього електричного поля. В багатьох тілах провідність визначається саме дірками.

За характером заповнення зон електронами і взаємного розташування зон речовини можна поділити на наступні групи.

Нехай зона повністю заповнена електронами. Над нею розташована заборонена зона шириною  $\Delta E_0 \geq 1 - 2 \text{ eV}$ , а ще вище – вільна зона провідності. Під дією зовнішнього електричного поля електрони не зможуть набувати додаткової енергії (оскільки всі рівні заняті), і тому електричного поля (тобто напрямленого руху електронів) не буде, не дивлячись на наявність вільних електронів, які здатні рухатися по всьому тілу. Такі матеріали називають *ізоляторами*.

Якщо ширина забороненої зони не перевищує  $\Delta E_0 \approx 1 - 2 \text{ eV}$ , то при температурі  $T > 0 \text{ K}$  деяке число електронів, розташованих коло верхнього краю заповненої зони, може набути енергії, достатньої для подолання забороненої зони і переходу у вільну зону провідності. Тоді остання виявиться частково заповненою зоною, де існує електронна провідність, а в заповненій (валентній) зоні з'являться дірки, які створять діркову провідність. Із збільшення температури число електронів у верхній зоні і дірок в нижній зоні швидко зростає, провідність тіла сильно збільшується, і воно наближається в цьому відношенні до провідників. Такі матеріали називаються *напівпровідниками*.

В деяких речовинах заповнена і вільна зони або прилягають щільно одна до одної (мал. в), або навіть перекриваються. При цьому виходить багато вільних рівнів, завдяки чому електрони можуть мати додаткову енергію. Під дією зовнішнього електричного поля електрони прискорюються і виникає переважний рух електронів в одну сторону, тобто виникає електричний струм. Такі матеріали називаються *провідниками*.

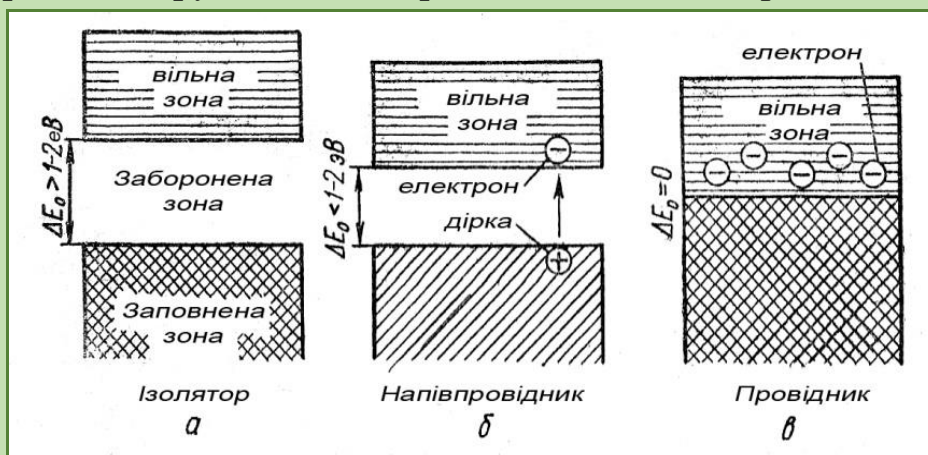


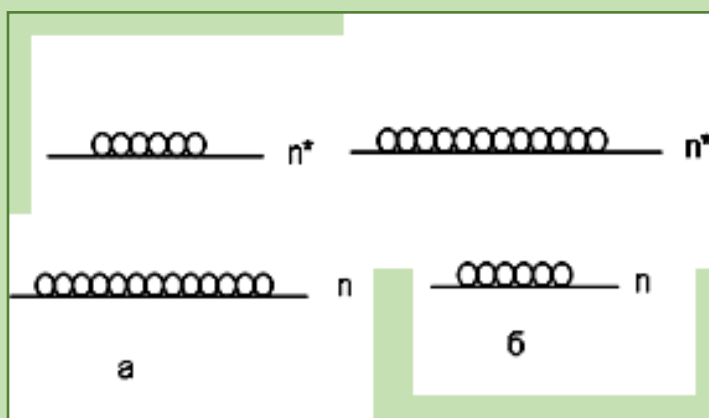
Рис. 10.

### *Резонансна взаємодія атомів з електромагнітним випромінюванням.*

**Лазер.** Нехай ми маємо матеріал, частина атомів якого знаходиться в збудженому стані  $E_B$  внаслідок поглинання падаючого пучка електромагнітного випромінювання. Ізольовані збуджені атоми спонтанно переходять на більш низькі енергетичні рівні незалежно один від одного, так що світло яке вони випромінюють не когерентне. Однак якщо на збуджений атом впаде фотон з частинкою  $\nu = (E_B - E_0) / h$  (резонансна частота), то час перебування атома в збудженому стані різко зменшиться і він буде випромінювати фотон з тим же напрямом, частотою і фазою, що й первинний індукційний фотон. Таким чином, внаслідок індукційного когерентного випромінювання квантів іншими збудженими атомами первинний або спонтанно випромінений квант може бути багаторазово розмножений.

В умовах рівноваги число  $n$  незбуджених атомів або молекул середовища більше числа  $n^*$  збуджених молекул. Така ситуація називається нормальним заселенням енергетичних рівнів (рис. а). Якщо яким-небудь способом добитися того, що  $n^*$  було більше  $n$  (цей стан називається інверсною заселеністю (рис. б)), то за рахунок індукційного випромінювання у світловий пучок добавляється більше фотонів, чим він втрачає на збудження атомів, і випромінювання буде не послаблюватися, а посилюватися.

Середовище з інверсним заселенням енергетичних рівнів, яка забезпечує підсилення приходячого через нього випромінювання, називається активним середовищем.



*Рис. 11.*

Якщо активне середовище помістити між двома паралельними дзеркалами (одне з яких робиться напівпрозорим для випуску випромінювання), то утворюється система, яка називається активним оптичним резонатором. Світлова хвиля, яка поширюється в активному се-

редовищі перпендикулярно дзеркалам, багатократно відбивається від них,

пройдений нею в активному середовищі шлях значно збільшується і відповідно зростає зусилля.

Користуючись аналогією з генераторами радіодіапазону, які складаються із резонансного коливального контуру, електронної підсилювальної лампи і джерела живлення, можна сказати, що в даному випадку ми маємо резонатор, в якому збуджуються незатухаючі електромагнітні коливання, активне середовище, яке забезпечує підсилення випромінювання і джерело енергії, що утворює інверсну заселеність в активному середовищі. Умовою виникнення незатухаючих коливань є (як і у випадку генератора радіохвиль) позитивний обернений зв'язок коливальною системою і активним середовищем. Для втілення такого оберненого зв'язку необхідно, щоб коливання системи і коливання, які проходять по каналу оберненого зв'язку, співпадали по фазі, про що згадувалося вище. Описана система являє собою, таким чином, генератор когерентного випромінювання, який називається оптичним квантовим генератором (ОКГ) або лазером.

Інверсна заселеність досягається шляхом використання додаткових джерел випромінювання, газового розряду та ін. Генерація виникає, коли інверсна заселеність досягає деякого граничного значення, що визначається втратами енергії в резонаторі, і продовжується до тих пір, поки більша частина енергії збудження атомів не перетвориться в енергію випромінювання.

***Резонансна взаємодія ядер з електромагнітним випромінюванням. Ефект Мессбауера.*** Під час поглинання резонансного гама-кванта атомним ядром, що знаходиться в незбудженому стані  $E_0$ , то ядро переходить в збуджений стан з енергією  $E_3$ . На відміну від резонансного поглинання квантів атомом, енергія збудженого стану ядра значно більша за енергію збудженого атома. Тому гама-квант, який випускається ядром при його переході в незбуджений стан має значно більшу енергію ніж квант світла, що випускається атомом. Згідно закону збереження імпульсу процес виходу кванта супроводжується віддачею. Якщо у випадку виходу світлового кванта малої енергії віддачею можна знехтувати, то при виході високоенергетичного гама-кванта велика частина енергії припадає на віддачу, тобто переходить в кінетичну



енергію ядра (або атома). Внаслідок цього енергія вихідного кванта буде менша за  $E_3 - E_0$ , на величину енергії віддачі  $E_r$ .

Теж саме отримуємо і при поглинанні кванта, тобто частина його енергії, яка дорівнює  $E_r$ , обов'язково повинна перейти в кінетичну енергію ядра або атома. Тому для поглинання кванта він повинен мати енергію  $E_3 - E_0 + E_r$ , тобто умова резонансу порушується. Це порушення не дуже різке, тому що енергія збудженого рівня, згідно співвідношення невизначеності, має деяку розкиданість  $\Delta E$  (що називається натуральною шириною збудженого рівня), так що навіть при  $E_r \neq 0$  можливе деяке резонансне поглинання (або вихід) гама-квантів. Крім того, внаслідок теплового руху атомів, один з них рухається в ту саму сторону, що і квант виходу, а другі – в зворотному напрямі. В першому випадку енергія кванта буде більша, а в другому менша енергії кванта, який випущений нерухомим атомом, на величину  $\Delta E_d$ . Ця величина називається доплерівським розширенням лінії і ще більше розмиває ширину резонансу.

На відміну від вище сказаного, якщо поглинаючий атом щільно взаємодіє з кристалом як одне ціле, то віддачу відчуває вся маса кристала. Тоді енергія віддачі  $E_r$  практично рівна нулю і резонансне поглинання (або випромінювання) дуже швидко збільшується при резонансній частоті  $(E_3 - E_0) / h$ . Це і є ефект Мессбауера. Характерним для нього є незвичайно вузький пік, тобто висока монохроматичність вихідних (або поглинутих) гама-квантів (відносний розкид енергії  $\Delta E / E \approx 10^{-12}$ ). Ця властивість лежить в основі багатьох застосувань ефекту Мессбауера в фізиці і техніці.

**Ядерна фізика** вивчає будову атомних ядер, ядерні перетворення і ядерні реакції.

**Ядра** складаються з протонів, які несуть одиничний позитивний заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, і нейтронів, які не знаходять електричний заряд. Протони і нейтрони разом називаються нуклонами (від слова *nucleus* – ядро). Число протонів  $Z$  в ядрі називається атомним номером і є основною характеристикою, що визначає індивідуальність елемента. Заряд ядра дорівнює  $Ze$  Кл.

**Ізотопи.** Ядра з однаковим числом  $Z$  протонів і різними числами  $N$  нейтронів являються різновидами одного і того ж хімічного елементу і називаються ізотопами.

**Масове число.** Повне число нуклонів в ядрі називається масовим числом  $A$ :

$$A = Z + N.$$

**Маса ядра. Дефект маси.** Маса стабільного ядра  $m_{\text{я}}$  завжди менша суми мас утворюючих його протонів і нейтронів на величину  $\Delta m$ . Ця величина називається дефектом маси.

Маса ядра вимірюється в атомних одиницях маси (а.о.м.) або в мегаелектронвольтах ( $MeV$ ). 1 а.о.м. рівна  $1/12$  маси атома вуглецю-12 і становить  $1,6604 \cdot 10^{-27}$  кг або  $931,4812 MeV (\approx 931,5 MeV)$ .

В таблицях зазвичай наводяться маси атомів  $M_A$ , які зв'язані з масами ядер співвідношенням

$$m_{\text{я}} = M_A - Zm_e$$

де  $m_e$  – маса електрона. Тому дефект маси ядра виражається наступним чином:

$$\Delta m_{\text{я}} = ZM_{\text{H}} + Nm_{\text{H}} - M_A = \frac{E_{\text{B}}}{c^2}$$

де  $M_{\text{H}}$  – маса атома водню (протон + електрон);  $m_{\text{H}}$  – маса нейтрона;  $M_A$  – маса атома (протони + електрони);  $c$  – швидкість світла. При обчисленні по цій формулі маса всіх  $Z$  електронів входить в першу і третю складову з різними знаками і тому скорочується.

**Енергія взаємодії.** Величина  $E_{\text{ЗВ}} = c^2 \Delta m$  називається енергією зв'язку ядра. Вона являє собою енергію, яка виділилась при злитті окремих нуклонів в ядро і яку потрібно затратити, щоб розчепити ядро на окремі нуклони.

Для вказівки на індивідуальне ядро (нукліда) його умовно позначають  ${}^A_Z X$ , де  $X$  – символ елемента (наприклад, дейтерій  ${}^2_1\text{H}$ , кобальт  ${}^{59}_{29}\text{Co}$  і т.д.).

**Радіус ядра.** Радіус ядра – умовна величина, так як далеко не всі ядра мають сферичну форму і, крім того, не зрозуміло, що мається на увазі під поверхністю ядра, оскільки вона створюється нуклонами, що безперервно ру-

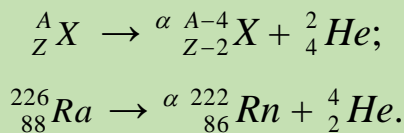
хаються. Середній радіус сферичного ядра наближено знаходиться за формулою

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}},$$

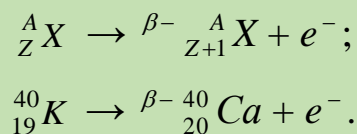
де  $r_0 \approx 1,4 \cdot 10^{-13}$  см.

**Радіоактивність.** Ядра деяких (переважно тяжких) елементів самостійно розпадаються, випускаючи при цьому  $\alpha$ -частинки (ядра гелію-4),  $\beta$ -частинки (електрони  $\beta^-$  або позитрони  $\beta^+$ ) і  $\gamma$ -кванти.

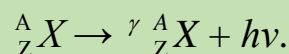
При  $\alpha$ -радіоактивності заряд ядра зменшується на 2 одиниці, а маса – на 4 одиниці, наприклад:



При  $\beta$ -розпаді заряд ядра збільшується на одиницю, а маса залишається незмінною, наприклад:



При  $\gamma$ -розпаді перетворення елементів не відбувається, але внутрішня енергія ядра зменшується:



Продукти розпаду можуть бути, в свою чергу, радіоактивними.

**Період піврозпаду.** Час, після якого початкове число  $I_0$  атомів радіоактивного елемента (або початкова маса) зменшується вдвоє, називається періодом піврозпаду  $T_{1/2}$  і вимірюється експериментально. Іноді в таблицях наводиться не період піврозпаду, а так звана стала розпаду  $\lambda$ . Вони пов'язані співвідношенням

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

**Закон радіоактивного розпаду.** Кількість ядер, які ще не розпалися в даного моменту часу  $t$ , дорівнює

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

де  $N_0$  – початкова кількість ядер в момент  $t = 0$ .

**Активність.** Число радіоактивних розпадів в одиницю часу називається активністю. Для довгоживучих радіоактивних елементів з великим періодом піврозпаду питома активність (активність одиниці маси) обчислюється за формулою

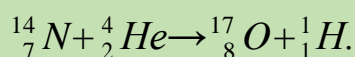
$$\lambda N = \lambda N_A / M,$$

де  $N_A$  – число Авогадро;  $M$  – атомна маса радіоактивного елемента, в а.о.м.;  $N$  – число ядер в 1 кг цього елемента. Одиницею активності в системі СІ являється 1 розпад за секунду. На практиці активність часто вимірюється в кюрі (Ки). 1 Ки являє собою активність, яка створена 1 г радію разом з продуктами його розпаду, і дорівнює  $3,7 \cdot 10^{10}$  розпадів в секунду.

Активність  $C$  зразка з масою  $m$  кг, атомною масою  $M$  а.о.м. і періодом піврозпаду  $T_{1/2}$  с знаходиться за формулою

$$C = \frac{m\lambda L}{M} = \frac{4,17 \cdot 10^{26} m}{MT_{1/2}} \text{ розп./с} = \frac{1,13 \cdot 10^{16} m}{MT_{1/2}} \text{ Ки}.$$

**Ядерна реакція** – взаємодія двох (або більше) частинок, що приводять до появи нових частинок. Наприклад, при випромінюванні азота  ${}^{14}_7\text{N}$   $\alpha$ -частинками  ${}^4_2\text{He}$  виникають ядра кисню і водню, тобто відбувається ядерна реакція. Цю реакцію можна записати у вигляді



або скорочено:  ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p) {}^{17}_8\text{O}$ .

Енергія ядерної реакції

$$Q = 931,5(\sum M_i - \sum M_k) \text{ MeV}.$$

де  $\sum M_i$  – сума мас частинок, які вступають у ядерну реакцію;  $\sum M_k$  – сума мас утворених частинок (виражених в а.о.м.).

Якщо  $Q > 0$ , реакція називається екзоенергетичною, тому що виділяється енергія. При  $Q < 0$  реакція називається ендоенергетичною і для її збудження необхідно затратити енергію (наприклад, пришвидшити частинки, тобто надати їм достатню кінетичну енергію).

Ділення ядра нейтронами – екзоенергетична реакція, при якій ядро, захоплюючи нейтрон, розкладається на два (інколи – на три) в більшості випадків нерівних радіоактивних частинок, випускаючи разом з цим гама-кванти і 2-3

нейтрони. Ці нейтрони при наявності навкруги достатньої кількості подільної речовини, можуть в свою чергу, викликати ділення оточуючих ядер. В цьому випадку виникає ланцюгова реакція, що супроводжується виділення великої кількості енергії. Енергія виділяється від того, що ядро яке ділиться, володіє або дуже малим дефектом маси, або навіть надлишком маси замість дефекту, що і являється причиною нестійкості таких ядер по відношенню до поділу. Ядра – продукт поділу – володіють значно великими дефектами маси, внаслідок чого в розглянутому процесі відбувається виділення енергії.

---

## ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

---

### ПЛАНИ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

#### Заняття 1.

**Тема заняття:** квантові властивості світла.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** корпускулярно-хвильовий дуалізм, кванти світла.

**План заняття:**

- корпускулярні властивості світла;
- гіпотеза Планка. Кванти світла;
- досліди Боте та Вавилова . Енергія, маса та імпульс фотона.

**Попередня підготовка:**

- математика (операції з степенями);
- хвильові властивості світла;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 31.1-31.13 [5]; 40.1-40.10 [7].

**Домашнє завдання:** 31.14-31.15 [5].

#### Заняття 2.

**Тема заняття:** фотоефект.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** закони фотоефекту, квантова теорія фотоефекту.

**План заняття:**

- відкриття фотоефекту;
- зовнішній та внутрішній фотоефект;
- закони фотоефекту;
- формула Ейнштейна для фотоефекту;

- фотоелементи та їх застосування.

**Попередня підготовка:**

- математика (дії з оберненими величинами);
- формула Планка для енергії фотона;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 40.15-40.24 [7]; 31.16-31.25 [5].

**Домашнє завдання:** 40.25-40.26 [7].

**Заняття 3.**

**Тема заняття:** тиск світла.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** досліди Лебедева, тиск світла.

**План заняття:**

- знаходження формули для тиску світла на основі квантової теорії;
- знаходження формули для тиску світла на основі електромагнітної теорії;
- досліди Лебедева;
- практичне застосування світлового тиску.

**Попередня підготовка:**

- математика (тригонометричні функції);
- імпульс фотона;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 31.29-31.35[5]; 40.27-40.35 [7].

**Домашнє завдання:** 40.36-40.38 [7].

**Заняття 4.**

**Тема заняття:** ефект Комптона.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** природа та одержання рентгенівського випромінювання, поглинання та розсіювання рентгенівського випромінювання.

**План заняття:**

- одержання рентгенівського випромінювання;

- поглинання та розсіювання рентгенівського випромінювання;
- ефект Комптона.

**Попередня підготовка:**

- математика (тригонометричні функції);
- хвильові властивості світла;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 31.39-31.43 [5]. 31.44-31.54 [5].

**Домашнє завдання:** 31.55-31.57 [5].

**Заняття 5.**

**Тема заняття:** випромінювання абсолютно чорного тіла.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** рівноважне випромінювання та його властивості, формула Планка.

**План заняття:**

- абсолютно чорне тіло;
- рівноважне випромінювання закон Кірхгофа;
- закон Стефана-Больцмана, закон Віна, формула Релея-Джинса;
- недоліки формул Віна і Релея-Джинса. Формула Планка;
- оптична пірометрія.

**Попередня підготовка:**

- математика (дроби, операції з степенями, інтеграли);
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 31.58-31.78 [5].

**Домашнє завдання:** 31.79-31.82 [5].

**Заняття 6.**

**Тема заняття:** корпускулярно-хвильові властивості речовини.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** хвилі Де-Бройля, досліди Девіссона і Джермера.

**План заняття:**



- гіпотеза Де-Бройля;
- експериментальне підтвердження гіпотези Де-Бройля;
- хвильові властивості елементарних частинок.

**Попередня підготовка:**

- математика (диференційне числення);
- корпускулярно-хвильовий дуалізм;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 32.1-32.9 [5]; 41.1-41.15 [7].

**Домашнє завдання:** 32.10-32.11 [5].

**Заняття 7.**

**Тема заняття:** співвідношення невизначеностей Гейзенберга.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** співвідношення невизначеностей Гейзенберга, співвідношення невизначеностей Гейзенберга для часу і енергії.

**План заняття:**

- просторова локалізація і визначення імпульсу частинки в класичній механіці;
- просторова локалізація і визначення імпульсу мікрочастинки в квантовій механіці;
- співвідношення невизначеностей Гейзенберга;
- співвідношення невизначеностей Гейзенберга для часу і енергії.

**Попередня підготовка:**

- теорія.

**Аудиторне завдання:** 41.20-41.32 [7]; 32.12-32.17 [5].

**Домашнє завдання:** 41.33-41.35 [7].

**Заняття 8.**

**Тема заняття:** рівняння Шредінгера. Його розв'язки для найпростіших задач квантової фізики.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** хвильова функція, рівняння Шредінгера, найпростіші задачі квантової фізики.

**План заняття:**

- поняття хвильової функції;
- причинно-наслідковий зв'язок в квантовій механіці;
- рівняння Шредінгера;
- частинка в нескінченно глибокій одновимірній потенціальній ямі;
- гармонічний осцилятор;
- проходження частинки крізь потенціальний бар'єр.

**Попередня підготовка:**

- математика (тригонометричні функції, диференціальне числення, теорія ймовірності).

**Аудиторне завдання:** 32.18-32.2 [5]; 41.36-41.45 [7].

**Домашнє завдання:** 32.29-32.30 [5].

**Заняття 9.**

**Тема заняття:** досліди Резерфорда. Планетарна будова атома.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** планетарна будова атома.

**План заняття:**

- перші моделі будови атома;
- досліди Резерфорда;
- планетарна будова атома.

**Попередня підготовка:**

- математика (тригонометричні функції, операції з степенями);
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 33.1-33.20 [5].

**Домашнє завдання:** 33.21-33.24 [5].

**Заняття 10.**

**Тема заняття:** постулати Бора. Теорія атома водню за Бором.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** постулати Бора, теорія атома водню за Бором.

**План заняття:**

- постулати Бора, дослід Франка і Герца;
- квантування енергії, імпульсу та моменту імпульсу;
- принцип Паулі;
- періодична система елементів Менделєєва.

**Попередня підготовка:**

- математика (диференційне числення);
- Планетарна будова атома;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 42.1-42.10 [7]

**Домашнє завдання:** 42.11-42.15 [7].

### **Заняття 11.**

**Тема заняття:** Спектральні лінії випромінювання атома водню.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** серії випромінювання атома водню.

**План заняття:**

- серія Бальмера;
- серія Лаймана.

**Попередня підготовка:**

- математика (дії з оберненими величинами);
- спектри;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 42.16-42.35 [7].

**Домашнє завдання:** 42.36-42.40 [7].

### **Заняття 12.**

**Тема заняття:** гальмівне і характеристичне рентгенівське випромінювання. Закон Мозлі.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** гальмівне і характеристичне рентгенівське випромінювання та його спектри, закон Мозлі.

**План заняття:**

- відкриття рентгенівського випромінювання;
- способи одержання рентгенівського випромінювання;
- закон Мозлі;
- застосування рентгенівського випромінювання.

**Попередня підготовка:**

- теорія.

**Аудиторне завдання:** 42.51-42.70 [7].

**Домашнє завдання:** 42.71-42.73 [7].

**Заняття 13.**

**Тема заняття:** будова ядра. Основні характеристики ядра.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** склад ядра, заряд і масове число ядра, енергія зв'язку, ядерні сили.

**План заняття:**

- склад ядра, заряд і масове число ядра;
- момент імпульсу та магнітний момент ядра;
- енергія зв'язку, дефект маси ядра;
- ядерні сили;
- моделі ядра.

**Попередня підготовка:**

- математика (дії з векторами);
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 35.1-35.8 [5]; 44.1-44.15 [7]

**Домашнє завдання:** 35.9-35.10 [5].

**Заняття 14.**

**Тема заняття:** Природна радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** радіоактивність, закон радіоактивного розпаду.

**План заняття:**

- відкриття радіоактивності;
- закон радіоактивного розпаду;
- одиниці вимірювання радіоактивності.

**Попередня підготовка:**

- математика (операції з степенями);
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 35.11-35.27 [5]; 45.1-45.13 [7]

**Домашнє завдання:** 35.28-35.31 [5].

**Заняття 15.**

**Тема заняття:** ядерні реакції. Поділ ядра.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** альфа-розпад, бета-розпад, штучна радіоактивність.

**План заняття:**

- правила зміщення і радіоактивні сім'ї;
- альфа-розпад;
- бета-розпад;
- гамма-випромінювання. Ефект Мессбауера;
- штучна радіоактивність.

**Попередня підготовка:**

- періодична система елементів Менделєєва.
- будова ядра;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 35.32-35.50 [5]; 46.1-46.20 [7].

**Домашнє завдання:** 35.51-35.54 [5].

**Заняття 16.**

**Тема заняття:** елементарні частинки. Прискорювачі частинок.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** класифікація елементарних частинок, фундаментальні взаємодії, закони збереження у фізиці елементарних частинок.

**План заняття:**

- класифікація елементарних частинок;
- фундаментальні взаємодії;
- закони збереження у фізиці елементарних частинок;
- прискорювачі частинок.

**Попередня підготовка:**

- корпускулярно-хвильові властивості речовини.
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 36.1-36.20 [5]; 48.1-48.20 [7].

**Домашнє завдання:** 36.21-36.25 [5].

**Заняття 17.**

**Тема заняття:** основні положення зонної теорії.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** хімічний зв'язок у твердих тілах, енергетичні зони у кристалах, рівняння Шредінгера для електрона у кристалі.

**План заняття:**

- типи хімічного зв'язку у твердих тілах;
- утворення енергетичних зон у кристалах;
- рівняння Шредінгера для електрона у кристалі.

**Попередня підготовка:**

- рівняння Шредінгера;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 43.1-43.18 [7].

**Домашнє завдання:** 43.19-43.21 [7].

**Заняття 18.**

**Тема заняття:** енергія Фермі.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** квантові статистики, модель вільних електронів та її застосування до металів.

**План заняття:**

- поняття про квантові статистики;
- розподіл Фермі-Дірака;
- розподіл Бозе-Ейнштейна;
- модель вільних електронів та її застосування до металів;
- енергія Фермі.

**Попередня підготовка:**

- математика (теорія імовірності);
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 34.1-34.16 [5].

**Домашнє завдання:** 34.17-34.19 [5].

**Заняття 19.**

**Тема заняття:** теплоємність твердих тіл.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** квантова теорія теплоємності твердих тіл, квантові явища при низьких температурах.

**План заняття:**

- класична теорія теплоємності;
- квантова теорія теплоємності твердих тіл;
- надпровідність;
- надплинність.

**Попередня підготовка:**

- математика (операції з степенями);
- молекулярно-кінетична теорія;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 43.22-43.32 [7].

**Домашнє завдання:** 43.33-43.34 [7].

**Заняття 20.**

**Тема заняття:** температура Дебая.

**Кількість годин:** 1.

**Мета заняття:** поняття про квазічастинки, теплопровідність твердих тіл.

### **План заняття:**

- фонони;
- магнони;
- плазмони;
- теплопровідність твердих тіл;
- температура Дебая.

### **Попередня підготовка:**

- квантова теорія теплоємності твердих тіл;
- теорія.

**Аудиторне завдання:** 34.20-34.28 [5].

**Домашнє завдання:** 34.29-34.30 [5].

## **ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ**

Розв'язування задач сприяє виробленню навичок у студентів використувати теоретичні знання з окремих розділів курсу атомна і ядерна фізика, дає змогу застосувати набуті знання з математики при складанні рівнянь, їх розв'язання та аналізу отриманих результатів.

При цьому варто користуватись загальноприйнятими вимогами до розв'язання задач з фізики, а саме:

- Ретельно прочитати умову задачі, записати всі відомі величини та обрати зручні одиниці числових значень;
- З'ясувати явище чи процес про які йдеться в задачі;
- Виконати рисунок, що допоможе у аналізі явища;
- Записати загальні закони чи математичні співвідношення для явища;
- Отримати кінцевий варіант виразу та виконати обчислення;
- Проаналізувати отриманий результат і звірити його з відповіддю, якщо така є.

### ***Практичне заняття №1, 2***



Кінетична енергія фотоелектронів. Що вилітають з металу, дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-16}$  Дж. Визначити довжину хвилі світла, що падає на метал. Роботу виходу не враховувати.

**Розв'язання.** З формули  $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  знаходимо  $\lambda = \frac{hc}{\varepsilon} \approx 1204 \cdot 10^{-10}$  м.

### Практичне заняття №3, 4

Поріг чутливості ока (мінімальний потік світла, що викликає відчуття світла) залежить від довжини світлової хвилі. Для зеленого світла ( $\lambda = 5,1 \cdot 10^{-7}$  м) він дорівнює наближено  $2,93 \cdot 10^{-17}$  Дж/с. Виразити поріг чутливості через кілька фотонів, що потрапляють в око за секунду.

**Розв'язання.** Згідно з умовою задачі можна записати:  $n h \nu = E$ , де  $n$  – кількість фотонів, а  $E$  – поріг чутливості. Звідси  $n = \frac{E}{h\nu} = \frac{E\lambda}{hc} \approx 75$  фотонів за секунду.

### Практичне заняття №5, 6

Знайти частоту світла вириваючого з поверхні металу електрони, що повністю затримуються зворотнім потенціалом у 3 В. Фотоефект у цього металу починається при частоті падаючого світла  $6 \cdot 10^{14}$  сек<sup>-1</sup>. Знайти роботу виходу електрона з цього металу.

**Розв'язання.** Так як фотоефект починається при  $\nu_0 = 6 \cdot 10^{14}$  сек<sup>-1</sup>, то звідси робота виходу електрона  $A = h\nu_0 = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = 2,48 \text{ eV}$ . Далі

маємо,  $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$ . Щоб затримати вилітаючі електрони, необхідно прикласти затримуюче електричне поле; при цьому  $eU_1 = \frac{mv^2}{2}$ . Таким чином,

$h\nu = A + eU_1$ , звідки  $\nu = \frac{A + eU_1}{h}$ . Підставляючи числові дані задачі, отримаємо, що  $\nu = 13,2 \cdot 10^{14}$  сек<sup>-1</sup>.

### Практичне заняття №7, 8

На поверхні площею  $100 \text{ см}^2$  щохвилини падає  $63 \text{ Дж}$  світлової енергії. Знайти величину світлового тиску у випадку коли поверхня: 1) повністю поглинає всі падаючі на неї промені, 2) повністю відбиває всі промені.

**Розв'язання.** Маємо  $p = \frac{F}{S}$ , де  $p$  – тиск світла,  $F$  – сила тиску світла на поверхню площею  $S$  круга. Але  $F = \frac{M}{l} = \frac{k\alpha}{l}$ , де  $M$  – обертальний момент,  $l$  – відстань від центру круга до осі обертання і  $\alpha$  – кут повороту круга. Для того, щоб зайчик по шкалі, віддалений від дзеркала на відстань  $y$ , відхилився на величину  $x$ , потрібно, щоб кут повороту дзеркальця задовольняв умові  $\text{tg } 2\alpha = \frac{x}{y}$  або, при малих кутах  $\text{tg } 2\alpha \approx 2\alpha = \frac{x}{y}$ . Таким чином,  $\alpha = \frac{x}{2y}$ . Тоді  $p = \frac{kx}{2lyS}$ . Підставляючи значення одержимо  $p = 3,85 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м}^2$ .

### Практичне заняття №9, 10

При одному з переходів електрона в атомі водню з одного стаціонарного рівня на інший відбулося випромінювання кванта світла з частотою  $\nu = 4057 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ . Визначити наскільки змінилась енергія електрона в атомі, в результаті цього випромінювання.

**Розв'язання.** Зміну енергії обчислюємо за формулою  $E_2 - E_1 = h\nu \approx 3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

### Практичне заняття №11

При якій температурі кінетична енергія молекули двоатомного газу буде рівна енергії фотона з довжиною хвилі  $\lambda = 5,89 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$ ?

**Розв'язання.** Маємо  $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$ . Для того щоб виник фотоефект, необхідно, щоб  $h\nu > A$ , тобто  $\nu > \frac{A}{h}$ . Але  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  та, аналогічно, для виникнення фотоефекту довжина хвилі падаючого світла повинна задовольняти нерівність

$\lambda < \frac{hc}{A}$ . В дослідах Столетова  $\lambda \leq 2,95 \cdot 10^{-4}$  мм, звідки неважко знайти, що  $A = 4,2$  еВ.

### Практичне заняття №12, 13

Знайти найменшу і найбільшу довжини хвиль спектральних ліній водню в видимій області спектра.

**Розв'язання.** Довжина хвилі спектральних ліній водню всіх серій визначаються формулою  $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ .

При  $k = 1, n = 2, 3, 4, \dots$  – серія Лаймана в ультрафіолетовій області;

при  $k = 2, n = 3, 4, 5, \dots$  – серія Бальмера в видимій області;

при  $k = 3, n = 4, 5, 6, \dots$  – серія Пашена

при  $k = 4, n = 5, 6, 7, \dots$  – серія Бреккета

при  $k = 5, n = 6, 7, 8, \dots$  – серія Пфунда

} в інфра-  
червоній  
області.

Таким чином, серія в видимій області спектра відповідає значенню  $k = 2$  та  $n = 3, 4, 5, \dots$ . Очевидно, найменша довжина хвилі спектральних ліній цієї серії буде при  $n = \infty$ . Тоді з (1) маємо  $\frac{1}{\lambda_1} = \frac{R}{4}$ ,

або  $\lambda_1 = \frac{4}{R} = 3,65 \cdot 10^{-7}$  м (з точністю до третьої значущої цифри). Найбільша

довжина хвилі відповідає  $n = 3$ :  $\lambda_2 = 6,56 \cdot 10^{-7}$  м. Таким чином, видимий

спектр водню лежить в інтервалі довжин хвиль від  $\lambda_1 = 3650$  А до  $\lambda_2 = 6560$  А.

### Практичне заняття №14

Знайти сталу решітки кам'яної солі, знаючи масу одного кіломоля кам'яної солі і її щільність ( $\rho = 2,2$  г/см<sup>3</sup>). Кристали кам'яної солі мають просту кубічну структуру.

**Розв'язання.** Об'єм одного кіломоля кам'яної солі  $V = \frac{\mu}{\rho}$ . В цьому об'ємі

знаходиться  $2N_o$  іонів, де  $N_o$  – число Авогадро. Тоді об'єм що приходить

на один іон:  $V' = \frac{\mu}{2\rho N_o}$ . Тоді відстань  $d$  між іонами (тобто стала решітки)

знаходиться з умови  $V' = d^3$ , тобто  $d = \sqrt[3]{V'} = \sqrt[3]{\frac{\mu}{2\rho N_o}} = 2,81 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,81 \text{ \AA}$ .

### **Практичне заняття №15, 16**

Скільки атомів полонію розпадається за добу з 1 млн. атомів?

**Розв'язання.** Число атомів радіоактивної речовини що розпадається за час  $dt$ , обчислюється за формулою  $dN = -\lambda N dt$ .

Очевидно, використовувати цю формулу для кінцевого проміжку часу  $\Delta t$  можна лише в тому випадку, коли число наявних атомів  $N$  можна рахувати за час  $\Delta t$  незмінним, тобто коли проміжок часу  $\Delta t$  менший періоду піврозпаду  $T$ . Неважко бачити (див. таблиці), що при розв'язуванні задачі ми можемо кількість атомів полонію що розпадаються за добу знайти по формулі:

$$|\Delta N| = \lambda N \Delta t = \frac{\ln 2}{T} N \Delta t.$$

Підставляючи числові данні задачі одержимо

$$\Delta N = \frac{0.693}{138} \cdot 10^6 \text{ діб} = 5025 \text{ діб}$$

Але при розв'язуванні задачі користуватись цією наближеною формулою не можна, так-як період піврозпаду радію (див. таблицю) всього 3,82 діб. Для знаходження числа атомів радію що розпалися за добу, потрібно користуватись формулою  $N = N_1 e^{-\lambda t}$ . Тоді шукане число

$$\Delta N = N_1 - N = N_1 - N_1 e^{-\lambda t} = N_1 (1 - e^{-\lambda t}).$$

Підставляючи числові данні знаходимо  $\Delta N = 10^6 (1 - 0.867) = 133000$  діб.

Якщо ж ми будемо знаходити  $\Delta N$  по наближеній формулі, то одержимо  $\Delta N = 192000$  діб. Тобто зробимо помилку порядку 10%. Можна переконатись,

що розв'язок задачі по вказаних формулах проводиться з точністю до третьої цифри до одної і тієї ж відповіді.

### *Практичне заняття №17, 18*

Природний уран являє собою сукупність трьох ізотопів:  ${}_{92}\text{U}^{234}$ ,  ${}_{92}\text{U}^{235}$ ,  ${}_{92}\text{U}^{238}$ . Склад урану  ${}_{92}\text{U}^{234}$  малий (0.006%), на частину  ${}_{92}\text{U}^{235}$  припадає 0,71%, а залишену масу (99,28%) складає уран  ${}_{92}\text{U}^{238}$ . Періоди піврозпаду цих ізотопів відповідно рівні  $2,5 \cdot 10^5$  років,  $7,1 \cdot 10^8$  років і  $4,5 \cdot 10^9$  років. Обчислити відсоткову частину радіоактивності, внесену кожним ізотопом в загальну радіоактивність природного урану.

**Розв'язання.** Процентний вміст радіоактивності, що вкладений кожним ізотопів в загальну радіоактивність природного урану, очевидно, визначиться відношенням числа розпадів в 1 сек. Кожного ізотопу до загального числа розпадів в 1 сек. Природного урану. Позначимо через  $M$  масу природного урану. Тоді маси ізотопів будуть рівні відповідно  $M_1 = 6 \cdot 10^{-5} M$ ,  $M_2 = 7,1 \cdot 10^{-3} M$  та  $M_3 = 99,28 \cdot 10^{-2} M$ . Число розпадів в 1 с що дає кожен ізотоп буде рівне  $\Delta N_1 = \frac{\ln 2}{T_1} N_1 \Delta t = \frac{\ln 2 N_0 M_1 \Delta t}{T_1 A_1}$ ,  $\Delta N_2 = \frac{\ln 2 N_0 M_2 \Delta t}{T_2 A_2}$ ,  $\Delta N_3 = \frac{\ln 2 N_0 M_3 \Delta t}{T_3 A_3}$ , де  $N_0$  – число Авогадро,  $T_i$  – період піврозпаду ізотопу,  $A_i$  – його атомна маса. Звідси шукане відношення для кожного з ізотопів буде рівне

$$\chi_1 = \frac{\Delta N_1}{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \Delta N_3} = \frac{\frac{M_1}{A_1 T_1}}{\frac{M_1}{A_1 T_1} + \frac{M_2}{A_2 T_2} + \frac{M_3}{A_3 T_3}}.$$

Підставляючи числові данні, неважко переконатися, що вся радіоактивність природного урану обумовлена ізотопом  ${}_{92}\text{U}^{238}$ , радіоактивність ізотопів  ${}_{92}\text{U}^{235}$  та  ${}_{92}\text{U}^{234}$  дуже мала.

### *Практичне заняття №19*

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

**Розв'язання.** Маємо  $\Delta M = ZM_{H^1} + (M - Z)M_H - M_A$ . В нас (див. таблиці)  $\Delta M = 3 \cdot 1,00814 + 4 \cdot 1,00899 - 7,01823$  а.о.м. = 0,04215 а.о.м. Так-як атомній одиниці маси відповідає енергія 931 MeV, тоді енергія зв'язку ядра  ${}^7_3\text{Li}$  буде рівна  $W = 0,04215 \cdot 931 \text{ MeV} = 39,3 \text{ MeV}$ . Цю енергію потрібно затратити щоб розщепити ядро  ${}^7_3\text{Li}$  на нуклони.

### **Практичне заняття №20**

Нейрон, має енергію в 4,6 MeV, в результаті зіткнення з протонами уповільнюється. Вважаючи, що нейтрон відхиляється при кожному зіткненні в середньому на  $45^\circ$ , знайти, скільки зіткнень він повинен здійснити, щоб його енергія зменшилась до 0,23 eV.

**Розв'язання.** При кожному зіткненні кінетична енергія нейтрона зменшується на половину. Отже після  $n$  зіткнень енергія нейтрона буде

$$W = \left(\frac{1}{2}\right)^n W_0. \text{ Звідси } n \lg 2 = \lg \frac{W_0}{W} = \lg(2 \cdot 10^7) \text{ та } n = \frac{\lg(2 \cdot 10^7)}{\lg 2} = 24 \text{ зіткнення.}$$

## **ТЕМАТИЧНІ ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ**

### **Енергія, імпульс і маса фотона**

1. Вкажіть прізвище вченого – засновника корпускулярної теорії світла:

- а) М. Планк;
- б) А. Ейнштейн;
- в) О. Столєтов;
- г) П. Лебедев.

2. Вкажіть прізвище вченого, який створив теорію фотоефекту:

- а) М. Планк;
- б) О. Френель;

- в) *Т. Юнг;*
- г) *А. Ейнштейн.*

3. Вкажіть явище у якому більше проявляються корпускулярні властивості світла:

- а) *фотоефект;*
- б) *дисперсія;*
- в) *дифракція;*
- г) *поляризація.*

4. Вкажіть, яка швидкість руху фотонів у вакуумі:

- а) *це залежить від маси фотона: чим маса більша , тим менша його швидкість;*
- б) *це залежить від енергії фотона: чим енергія менша, тим менша швидкість;*
- в) *це залежить від енергії фотона: чим енергія більша, тим менша швидкість;*
- г) *300 000 км/с.*

5. Вкажіть формулу для визначення енергії фотона:

- а)  *$E = h \lambda;$*
- б)  *$E = h\nu/\lambda;$*
- в)  *$E = hc/\lambda;$*
- г)  *$E = hc/\nu.$*

6. Вкажіть формулу, за якою визначається маса фотона:

- а)  *$m = h\nu/c^2;$*
- б)  *$m = h\lambda/c;$*
- в)  *$m = h\nu/c;$*
- г)  *$m = \lambda\nu/c^2.$*

7. Вкажіть формулу, за якою можна визначити імпульс фотона:

- а)  *$p = h/\nu;$*
- б)  *$p = h\nu/c;$*
- в)  *$p = h\lambda;$*

г)  $p = hc$ .

8. Виберіть числове значення сталої Планка:

а)  $h = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \cdot \text{с};$

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

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

г)  $h = 1,38 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с}.$

9. Обчислити імпульс фотона, енергія якого  $5 \times 10^{-19} \text{ Дж}$ :

а)  $4,82 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с};$

б)  $4,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с};$

в)  $1,8 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с};$

г)  $1,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$

10. Визначити масу та імпульс фотона, довжина хвилі якого 510 нм:

а)  $4,3 \cdot 10^{-36} \text{ кг}; 1,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с};$

б)  $4,8 \cdot 10^{-36} \text{ кг}; 1,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с};$

в)  $4,3 \cdot 10^{-36} \text{ кг}; 2,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с};$

г)  $4,8 \cdot 10^{-36} \text{ кг}; 2,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$



## *Фотоефект*

1. Вкажіть у чому полягає явище фотоефекту:

- а) у випромінюванні електронів з поверхні металу;*
- б) у випромінюванні електронів під дією світла;*
- в) у випромінюванні світла атомами – окремими порціями – квантами;*
- г) у випромінюванні фотонів під дією енергії.*

2. Вкажіть назву максимальної довжини світлової хвилі, що падає на поверхню металу при перевищенні якої не відбувається фотоефект:

- а) фіолетова межа фотоефекту;*
- б) жовта межа фотоефекту;*
- в) червона межа фотоефекту;*
- г) зелена межа фотоефекту.*

3. Виберіть рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

- а)  $h\nu = A_{\epsilon} - W_{\epsilon}$ ;*
- б)  $h\nu = A_{\epsilon} + W_{\epsilon}$ ;*
- в)  $h\nu = W_{\epsilon} - A_{\epsilon}$ ;*
- г)  $h\lambda = A_{\epsilon} + W_{\epsilon}$ .*

4. Вкажіть прізвище українського вченого, який розробив метод просвітлення оптики:

- а) Іван Пулюй;*
- б) Юрій Кондратюк;*
- в) Борис Патон;*
- г) Олександр Смакула.*

5. Вкажіть прізвище вченого, який створив теорію фотоефекту:

- а) М. Планк;*
- б) О. Френель;*
- в) Т. Юнг;*
- г) А. Ейнштейн.*

6. Вкажіть, від чого залежить максимальна кінетична енергія фотоелектронів і як:

- а) від маси фотонів; обернено пропорційно;*
- б) від заряду електронів; обернено пропорційно;*
- в) від маси електронів; прямо пропорційно;*
- г) від швидкості фотонів; прямо пропорційно.*

7. Червоною межею фото ефекту для металу є зелене світло. Вкажіть опромінення цього металу яким світлом викличе фото ефект:

- а) червоним;*
- б) жовтим;*
- в) синім;*
- г) жовтогарячим.*

8. Закінчіть речення: Робота виходу електронів з металу не залежить від

...

- а) маси електрона;*
- б) густини металу;*
- в) заряду електрона;*
- г) імпульсу електрона.*

9. Визначте довжину хвиль фіолетового світла, частота якого  $7,5 \cdot 10^{14}$  Гц у склі, де їх швидкість  $2,22 \cdot 10^8$  м/с:

- а)  $3 \cdot 10^{-7}$  м;*
- б)  $4,4 \cdot 10^{-7}$  м;*
- в)  $2 \cdot 10^{-7}$  м;*
- г)  $4,2 \cdot 10^{-9}$  м.*

10. Червона межа фото ефекту для срібла дорівнює 0,26 мкм. Визначте роботу виходу електронів із срібла:

- а)  $4,37 \cdot 10^{-19}$  Дж;*
- б)  $4,78 \cdot 10^{-19}$  Дж;*
- в)  $19,27 \cdot 10^{-19}$  Дж;*

г)  $56,3 \cdot 10^{-19}$  Дж.

### *Тиск світла*

1. Хто висловив ідею про те, що світло повинно тиснути на освітлювані ним поверхні:

- а) *Й. Кеплер;*
- б) *О. Френель;*
- в) *Т. Юнг;*
- г) *І. Ньютон.*

2. Яка природа світла утруднює наочну інтерпретацію властивостей випромінювання:

- а) *одинична;*
- б) *двоїста;*
- в) *троїста;*
- г) *немає правильної відповіді.*

3. Чим зумовлений тиск світла з погляду квантової теорії:

- а) *змінюю часу;*
- б) *змінюю імпульсу фотонів поглинання;*
- в) *змінюю маси;*
- г) *змінюю імпульсу фотонів при поглинанні та відбиванні їх поверхнею.*

4. Хто теоретично обґрунтував необхідність існування тиску світла:

- а) *Вінн;*
- б) *Френель;*
- в) *Пулюй;*
- г) *Максвел.*

5. В якому році П. М. Лебедев вперше експериментально виміряв тиск світла на тверді тіла:

- а) *1891 р.;*

- б) 1966 р.;
- в) 1902 р.;
- г) 1900 р.

6. Хто у 1923 р. повторив дослід Лебедева:

- а) Максвел;
- б) В. Герлах;
- в) Рентген;
- г) Ньютон.

7. Як позначається коефіцієнт відбивання:

- а)  $\rho$ ;
- б)  $m$ ;
- в)  $d$ ;
- г)  $p$ .

8. За якою формулою визначається тиск світла, що створює плоска електромагнітна хвиля:

- а)  $p = (2 + \rho^2)w \cos \theta$ ;
- б)  $p = (1 + \rho)w \cos i$ ;
- в)  $\rho = m / V$ ;
- г)  $p = \Delta F / m$ .

9. За якою формулою визначається тиск світла при нормальному падінні світла ( $i = 0$ ):

- а)  $p = (3 + \rho) w$ ;
- б)  $p = (1 + \rho) w \cos i$ ;
- в)  $p = (1 + \rho) w$ ;
- г)  $p = (1 + \rho) w \cos 2\pi$ .

10. У якому році П. М. Лебедев виміряв тиск світла на газі:

- а) 1908 р.;
- б) 1911 р.;

6) 1902 p.;

7) 1923 p.

## *Ефект Комптона*

1. В якому явищі найбільш переконливо проявляються корпускулярні властивості світла:

- а) ефект Доплера;*
- б) ефект Комптона;*
- в) фотоефект;*
- г) дисперсія.*

2. Скільки дорівнює довжина хвилі  $\lambda$  в оптичній сатині спектра:

- а)  $10^2$  нм;*
- б)  $10^6$  нм;*
- в)  $10^3$  нм;*
- г)  $10^5$  нм.*

3. В якому році Комптон досліджував розсіяння рентгенівського випромінювання різними речовинами:

- а) 1911 р.;*
- б) 1922 р.;*
- в) 1923 р.;*
- г) 1921 р.*

4. Якою формулою записується ефект Комптона:

- а)  $\Delta\lambda = \Lambda_0 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right);$*
- б)  $\Delta\lambda = \Lambda_0 \sin \alpha ;$*
- в)  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda ;$*
- г)  $\Delta\lambda = \Lambda_0 \sin^2 \alpha .$*

5. Скільки становить комптонівська довжина хвилі  $\Lambda_0$ :

- а)  $2,6 \cdot 10^{-9}$  м;*
- б)  $2,4 \cdot 10^{-12}$  м;*
- в)  $2,1 \cdot 10^{-14}$  м;*

г)  $2,4 \cdot 10^{-6}$  м.

6. Що підтверджує ефект Комптона:

- а) звукову теорію світла;
- б) теорію мікрочастинок;
- в) рентгенівську теорію світла;
- г) фотону теорію світла.

7. Чому дорівнює імпульс фотона  $p$ :

- а)  $p = h\nu$ ;
- б)  $p = h\nu / c$ ;
- в)  $p = \nu / c$ ;
- г)  $p = m_0c$ .

8/ За якою формулою визначається Комптонівська довжина хвилі  $\Delta\lambda$ :

- а)  $\Delta\lambda = h / m^2c$ ;
- б)  $\Delta\lambda = h/m_0c$ ;
- в)  $\Delta\lambda = \lambda_0 \sin \alpha$ ;
- г)  $\Delta\lambda = h\nu / 2$ .

9. Хто експериментально довів, що розсіяний рентгенівський фотон і електрон віддачі з'являються одночасно:

- а) Ньютон;
- б) Максвел;
- в) Рентген;
- г) Г. Гейгер і Х. Бете.

10. Яке зіткнення рентгенівського фотона розглядається у ефекті Комптона:

- а) просте;
- б) пружне;
- в) не пружне;
- г) складне.

## *Хвильові властивості речовин*

1. У якому році Луї де Бройль висунув думку про хвильові властивості частинок (електронів):

- a) 1925 р.;
- б) 1923 р.;
- в) 1924 р.;
- г) 1921 р.

2. Чому дорівнює енергія рухомої частинки  $E$ :

- a)  $E = mc$ ;
- б)  $E = h\nu$ ;
- в)  $E = h / c$ ;
- г)  $E = h / \nu$ .

3. За якою формулою визначається фазова швидкість:

- a)  $u = S / t$ ;
- б)  $u = dw / dk$ ;
- в)  $u = w / i$ ;
- г)  $u = 2k / t$ .

4. Яка швидкість характеризує швидкість перенесення енергії і маси частинки:

- a) *групова*;
- б) *фазова*;
- в) *миттєва*;
- г) *кінцева*.

5. Хвильовим пакетом називається ...

- a) *суперпозиція хвиль*;
- б) *група хвиль, яка поширюється як деякий обмежений у просторі об'єкт*;
- в) *хвилі, які мало чим між собою відрізняються*;
- г) *хвилі, що зв'язані між собою*.



6. Співвідношення невизначеностей – це

- a) група хвиль;
- б) довжина хвилі;
- в) ефект Комптона;
- г) математичне вираження частинок, як корпускулярних так і хвильових властивостей.

7. Розрізняють співвідношення невизначеностей:

- a) просторове, часове;
- б) просторове, імпульсне;
- в) енергетичне, квантоване;
- г) часове, просте.

8. Тунельним ефектом називається ...

- a) суперпозиція хвиль;
- б) проходження частинки крізь потенціальний бар'єр;
- в) проходження частинки з сталою довжиною;
- г) проходження частинки з сталим імпульсом.

9. Розміри хвильового пакету становлять:

- a)  $(6\pi, \pi)$ ;
- б)  $(-2\pi, 4\pi)$ ;
- в)  $(-\pi, \pi)$ ;
- г)  $(\pi/2, \pi)$ .

Чому дорівнює хвилі де Бройля:

- a)  $\lambda = \frac{2\pi}{\sqrt{2mE}}$ ;
- б)  $\lambda = v / c$ ;
- в)  $\lambda = \pi / 2m$ ;
- г)  $\lambda = hv / c$ .

## *Атом бора. Рентгенівські промені*

1. У практичній спектроскопії переважно застосовують:

- a) квантове число;*
- б) хвильове число;*
- в) магнітне число;*
- г) спін електрона.*

2. Сталою Рідберга  $R$  називають ...

- a)  $R = 5B$ ;*
- б)  $R = 2 / B$ ;*
- в)  $R = 4 / B$ ;*
- г)  $R = 4B$ .*

3. Узагальнена формула Бальмера записується так:

- a)  $w = R(1 / n^2 - 1 / m^2)$ ;*
- б)  $w = R(1 / k^2 + 1 / m^2)$ ;*
- в)  $w = R(1 / 4^2 - 1 / m^2)$ ;*
- г)  $w = R(1 / n^2 + 1 / m^2)$ .*

4. Серія Лаймена записується так:

- a)  $w = R(1 / 6^2 - 1 / m^2)$ ;*
- б)  $w = R(1 / 1^2 - 1 / m^2)$ ;*
- в)  $w = R(1 / 3^2 - 1 / m^2)$ ;*
- г)  $w = R(1 / 4^2 - 1 / m^2)$ .*

5. Серія Пашена записується так:

- a)  $w = R(1 / 1^2 - 1 / n^2)$ ;*
- б)  $w = R(1 / n^2 - 1 / m^2)$ ;*
- в)  $w = R(1 / 4^2 - 1 / m^2)$ ;*
- г)  $w = R(1 / 3^2 - 1 / m^2)$ .*

6. Спектральний терм записується так:

- a)  $w = R(1/n^2 - 1/m^2)$ ;
- б)  $w = T(k) - T(h)$ ;
- в)  $w = T(n) - T(m)$ ;
- г)  $w = T(n) + T(k)$ .

7. Сукупність спектральних ліній, які у своїй послідовності і в розподілі інтенсивності виявляють певну закономірність, називається ...

- a) *спектральною серією*;
- б) *спектральним термом*;
- в) *границею лінії*;
- г) *тунельним ефектом*.

8. Для яких частинок хвилі де Бройля безпосередньо зв'язані з електромагнітними хвилями:

- a)  $m_0 = 1$ ;
- б)  $m_0 = 0$ ;
- в)  $m_0 = 1/2$ ;
- г)  $m = 3$ .

9. Для частинок з масою  $m_0 > 0$ , фазова швидкість хвиль де Бройля у вакуумі:

- a) *менша за швидкість світла*;
- б) *дорівнює швидкості світла*;
- в) *дорівнює нулю*;
- г) *більша за швидкість світла*.

10. Спектральні терми дорівнюють:

- a)  $T(m) = R/m^2, T(n) = R/n^2$ ;
- б)  $T(m) = km, T(n) = Rn^2$ ;
- в)  $T(m) = Rmk, T(n) = R/n$ ;
- г)  $T(m) = R/m, T(n) = Rk/n^2$ .

## Постулати бора

1. Яке з наведених тверджень першого постулату Бора є вірним:

- а) атом може знаходитись не в усіх станах, які допускає класична механіка, а лише в певних вибраних станах, які характеризуються певним значенням енергії;
- б) атом може знаходитись в усіх допустимих станах в класичній механіці;
- в) атом може знаходитись в усіх станах, які допускає класична механіка, а також в певних вибраних станах, які характеризуються певним значенням енергії;
- г) будь-який фотон може знаходитись не в усіх станах, які допускає класична механіка, а лише в певних вибраних станах, які характеризуються певним значенням енергії.

2. Сформулюйте другий постулат Бора:

- а) під час переходу із будь-якого стаціонарного стану відбувається випромінювання фотона;
- б) перехід від одного стаціонарного стану з більшою енергією у стаціонарний стан з меншою енергією неможливий;
- в) під час переходу із стаціонарного стану з більшою енергією у стаціонарний стан з меншою енергією відбувається випромінювання фотона з енергією  $h\nu = E_n - E_m$ ;
- г) під час переходу із стаціонарного стану з меншою енергією у стаціонарний стан з більшою енергією відбувається випромінювання фотона з енергією  $h\nu = E_m - E_n$ .

3. За якою формулою на основі двох постулатів Бора знаходять радіуси стаціонарних орбіт?

а) 
$$r = \frac{Z}{4\pi\epsilon_0 p};$$

б) 
$$r = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0 mv^2};$$

$$в) \quad r = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar}{Ze^2m}n^2;$$

$$г) \quad r = \frac{Ze}{2\pi}.$$

4. Яке значення сталої Рідберга є найвірнішим?

$$а) \quad R = \frac{mZ^2e^4}{64\pi^3\epsilon_0^2\hbar^3c};$$

$$б) \quad R = \frac{mZ^2e^4}{8\pi^3\epsilon_0^2\hbar^3c};$$

$$в) \quad R = \frac{mZe^4}{64\pi\epsilon_0\hbar^3c};$$

$$г) \quad R = \frac{mZ^2e^4}{\pi^3\epsilon_0^2\hbar^3c}.$$

5. Поглинання світла – це...

- а) перехід електрона із стаціонарного стану з меншою енергією в збуджений стаціонарний стан;
- б) проникнення електронів в різні середовища;
- в) перехід електронів в різні енергетичні стани;
- г) хаотичний рух електронів.

6. Для атома водню значення енергії стаціонарних станів такі:

$$а) \quad \omega_{mn} = T_m - T_n;$$

$$б) \quad E_m = \hbar T_m;$$

$$в) \quad \omega_{mn} = \frac{E_m - E_n}{\hbar};$$

$$г) \quad E_n = -\frac{2\pi\hbar c R}{n^2}.$$

7. Яке з наведених чисел є магнітним квантовим числом?

- а)  $n$ ;
- б)  $m$ ;
- в)  $l$ ;

г) с.

8. Дайте визначення гіромагнітного відношення орбітального руху  $g$ :

- а) відношення магнітного моменту орбітального руху електрона  $M$  (або його проекції  $M_z$ ) до механічного моменту  $L$  (або його проекції  $L_z$ ) однакове для всіх орбіт;
- б) відношення магнітного моменту орбітального руху електрона  $M$  (або його проекції  $M_z$ ) до механічного моменту  $L$  (або його проекції  $L_z$ ) не однакове для всіх орбіт;
- в) проекція магнітного моменту орбітального руху електрона на напрям магнітного поля;
- г) орієнтація орбіт і векторів  $L$  у просторі руху на виділений напрям не можуть добувати довільних значень.

9. Зазначте умову квантування:

- а)  $\oint sdq = nh$ ;
- б)  $\oint pdq = n\hbar$ ;
- в)  $pdq = nh$ ;
- г)  $\oint Mdq = n\hbar$ .

10. На якій орбіті швидкість електрона атома водню дорівнює 734 км/сек.?

- а)  $k = 1$ ;
- б)  $k = 2$ ;
- в)  $k = 3$ ;
- г)  $k = 4$ .

## *Рентгенівське випромінювання.*

1. Рівняння Ейнштейна, стосовно фотоефекту:

а)  $eU = \hbar\omega - A;$

б)  $eU = \hbar\omega + A;$

в)  $eU = h\nu - A;$

г)  $eU = \hbar\omega_{\max}.$

2. Що таке короткохвильова межа суцільного рентгенівського випромінювання?

а) гранична чистота  $\mu;$

б) гранична чистота  $\omega_{\max} (\lambda_{\min});$

в) гранична довжина хвилі  $\lambda_{\max};$

г) гранична напруга  $U.$

3. Дайте визначення Ефекту Комптона:

а) інтенсивність розсіювання рентгенівських променів довжина хвилі, яких порядку атомних розмірів навпаки виявилась незалежною від довжини хвилі;

б) довжина хвилі розсіяних променів  $\lambda$  менша за довжину хвилі  $\lambda_0$ , причому різниця довжин хвиль спадає зі збільшенням кута розсіювання;

в) довжина хвилі розсіяних променів  $\lambda$  більша за довжину хвилі  $\lambda_0$ , первинного рентгенівського проміння, причому різниця довжин хвиль зростає із збільшенням кута розсіювання, але не залежить від матеріалу розсіювача;

г) явище розсіювання світла (рентгенівського випромінювання) на вільних або слабо зв'язних електронах спадає зі збільшенням кута розсіяння.

4. Яке позначення Комптонівської довжини хвилі?

а)  $\Lambda = \frac{2\pi\hbar}{m_0c};$

б)  $\Delta\lambda = 2\lambda \sin^2 \frac{\varphi}{2};$

в)  $\Delta\lambda = \frac{2\pi\hbar}{m_0c}(1 - \cos\varphi);$

г)  $\Lambda = 2\pi \frac{hc}{\lambda}.$

5. Хто вивів формулу  $\sigma_a = \frac{8\pi e^4}{3m^2 c^4} Z$  для атомного коефіцієнта розсіяння?

- а) Ейнштейн;
- б) Шредінгер;
- в) Томсон;
- г) Комптон.

6. Що захищає людей від рентгенівського випромінювання?

- а) Тонкий листок алюмінію;
- б) Свинцеве скло;
- в) Товста дошка;
- г) Товстий шар металу.

7. В процесі чого рентгенівський пучок відчуває ослаблення, його інтенсивність зменшується?

- а) Розсіяння і поглинання;
- б) Випромінювання;
- в) Проходження через перешкоду;
- г) Розкладання в спектр.

8. Що стоїть в основі розсіяння рентгенівських променів?

- а) Закон Релея;
- б) Ефект Комптона;
- в) Закон Ейнштейна для фотоефекту;
- г) Закон Стефана-Больцмана.

9. Відносна зміна довжини хвилі буде більшою...

- а) чим менша довжина хвилі випромінювання, яка розсіюється;
- б) чим більша довжина хвилі випромінювання, яка розсіюється;



- в) довжини випромінювання і розсіяння хвиль рівні;
- г) чим більший спектр випромінювання.

10. При якій найменшій напрузі рентгенівська трубка може дати промені найменшої довжини хвилі  $0,113 \text{ \AA}$  ?

- а) 50 кВ;
- б) 93 кВ;
- в) 56 кВ;
- г) 90 кВ.

### Фізика ядра

1. Чому рівний радіус ядра з масовим числом  $A$ ?

- а)  $R = 1.23 * 10^{-13} A^{\frac{1}{3}} \text{ см};$
- б)  $R = 6.62 * 10^{-13} A^{\frac{1}{3}} \text{ см};$
- в)  $R = 1.6 * 10^{-13} A^{\frac{1}{3}} \text{ см};$
- г)  $R = 3.5 * 10^{-13} A^{\frac{1}{3}} \text{ см}.$

2. Енергія зв'язку – це...

- а) енергія, яка потрібна, щоб розщепити ядро на окремі нуклони;
- б) енергія, яка зв'язує окремі нуклони в одне ціле;
- в) енергія, що розчіплює ядро на протони;
- г) енергія, що з'єднує всі елементарні частинки.

3. За допомогою чого визначаємо енергію зв'язку ядра

$$E_{\text{зв.ядра}} = \Delta m_{\text{ядра}} c^2 ?$$

- а) за природною радіоактивністю;
- б) за допомогою теорії будови ядра;
- в) за допомогою дефекту маси;
- г) за допомогою ефекту Комптона.

4. В чому вимірюється енергія зв'язку ядра?

- a) у В;
- б) у MeB;
- в) у Кл;
- г) у Дж.

5. Радіоактивний препарат, що міститься на дні каналу в шматочку свинцю дає вузький пучок радіоактивного випромінювання. Вкажіть правильне твердження:

- a) магнітне поле напрямлене від нас;
- б)  $\beta$ -частинки можуть відхилитися під дією електричного поля;
- в)  $\gamma$ -кванти можуть відхилитися під дією електричного поля;
- г)  $\alpha$ -розпад.

6. Відбувся  $\alpha$ -розпад Радію  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ , що у результаті цього утворилось?

- a) Утворилось ядро атома іншого хімічного елемента  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2\text{He}$ ;
- б) Утворилось ядро з масовим числом 224:  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ ;
- в) Утворилося ядро з атомним номером 90  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ ;
- г) Кількість протонів у ядрі зменшилося на 1.

7. З ядра натрію  ${}^{22}_{11}\text{Na}$  вилетів електрон в результаті цього:

- a) в результаті розпаду масове число ядра  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e$ ;
- б) в результаті розпаду утворилося ядро магнію  ${}^{22}_{12}\text{Mg}$ :  
 ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{12}\text{Mg} + {}^0_{-1} e$ ;
- в) відбувся  $\alpha$ -розпад ядра;
- г) атомний номер утвореного ядра дорівнює 9:  ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{12}\text{Mg} + {}^0_{-1} e$ .

8. Установіть відповідність між формулами і їхніми назвами, і біля кожного виразу поставте відповідну літеру:

- a) закон радіоактивного розпаду;      А.  $E_{зв} = \Delta M * c^2$ ;

- б) *дефект маси;* Б.  $N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$ ;
- в) *енергія зв'язку;* В.  $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$ ;
- г) *термоядерна реакція* Г.  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ .

9. В Урані – 235 може відбуватися ланцюгова ядерна реакція поділу, які фактори цьому сприяють?

- а) *У ході ланцюгової реакції поділ ядра відбувається в результаті влучення в нього протона;*
- б) *У ході ланцюгової реакції поділ ядра відбувається в результаті влучення в нього нейтрона;*
- в) *Ланцюгова реакція відбувається з допомогою поглинутої енергії;*
- г) *У результаті поділу ядра утворюється тільки електрон.*

10. Радіус Сонця  $6.95 \cdot 10^8 \text{ м}$ , а середня густина  $1410 \text{ кг/м}^3$ . Яким був би радіус Сонця, якщо при тій же масі його густина дорівнювала би густині ядерної речовини?

- а)  $R = 12.7 \text{ км};$
- б)  $R = 10 \text{ км};$
- в)  $R = 13 \text{ км};$
- г)  $R = 18 \text{ км}.$

### ***Природна радіоактивність***

1. Що таке радіоактивність?

- а) *Під радіоактивністю розуміють спонтанне перетворення ізотопів хімічних елементів зумовлене розрядом їх атомних ядер;*
- б) *При радіоактивності ядра не розпадаються;*
- в) *Це випромінювання шкідливих, небезпечних речовин;*
- г) *Активна взаємодія електронів різних речовин.*

2. Що називають природною радіоактивністю?

- a) Ядра стабільних ізотопів можуть ставати радіоактивними після опромінення їх певним чином;
- б) Радіоактивність, яку мають нестабільні існуючі у природі ядра;
- в) Радіоактивність, яку мають усі стабільні ядра;
- г) Усі явища, що відбуваються в природі.

3. Які із зазначених променів є природно-радіоактивними?

- a)  $\alpha, \beta, \mu$  ;
- б)  $\beta, \gamma, \delta$  ;
- в)  $\alpha, \beta, \gamma$  ;
- г)  $\mu, \delta, \gamma$  .

4. Яке з наведених рівнянь характеризує закон радіоактивного розпаду?

- a)  $N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$  ;
- б)  ${}^{14}_7N + {}^4_2He \rightarrow {}^{17}_8O + {}^1_1p$  ;
- в)  $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$  ;
- г)  $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$  .

5. Кількісною оцінкою дії радіоактивного і рентгенівського випромінювання на речовину є:

- a) порція опромінення;
- б) опромінення певної кількості рентгенівського випромінювання;
- в) доза випромінювання;
- г) порція в 1 кг.

6. Що є мірою іонізації дії рентгенівського та  $\gamma$  -випромінювання у повітрі і чисельно дорівнює відношенню сумарного заряду всіх іонів одного знака  $\Delta Q$  створених у повітрі вторинними частинками (електронами і позитронами) до маси  $\Delta m$  повітря в цьому?

- a)  $D_{\text{погл}} = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$  ;

б)  $D_{\text{експоз}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ ;

в)  $D_{\text{екв}} = KD_{\text{погл}}$ ;

г)  $D = \frac{\hbar \omega}{c} n$ .

7. Що відбувається при  $\alpha$ -розпаді?

- а) Утворюється ізотоп іншого елемента порядковий номер якого у періодичній системі Менделєєва зміщується на три одиниці вправо від номера елемента, що зазнав розпаду;
- б) Утворюється ізотоп іншого елемента порядковий номер якого у періодичній системі Менделєєва зміщується на дві одиниці вліво від номера елемента, що зазнав розпаду;
- в) Не зміщується ні вправо, ні вліво;
- г) Змінюється на одну одиницю вліво.

8. Які промені є найбільш небезпечними?

- а)  $\alpha$ -промені;
- б)  $\beta$ -промені;
- в)  $\gamma$ -промені;
- г)  $\Lambda$ -випромінювання.

9. Що таке  $\beta$ -розпад?

- а) Це вид радіоактивного перетворення нестабільних атомних ядер;
- б) Це ядерні перетворення  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  і електронне захоплення;
- в) Штучні ядра які зазнали позитронного  $\beta$ -розпаду;
- г) Штучні ядра які зазнали природного  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -розпаду.

10. Чому дорівнює період піврозпаду Вісмуту  ${}_{83}^{210}\text{Bi}$ , якщо відомо, що 1г

Вісмуту викидає  $4.58 \cdot 10^{16}$   $\beta$ -частинок за 1с?

- а)  $T = 5,02$  доби;
- б)  $T = 6$  діб;
- в)  $T = 10$  діб;
- г)  $T = 4,5$  діб.

## *Ядерні реакції. Штучна радіоактивність*

1. Що ми розуміємо під ядерними реакціями?

- а) Перетворення ядер при взаємодії одне з одним, а не з елементарними частинками;*
- б) Перетворення ядер при взаємодії з елементарними частинками та одне з одним;*
- в) Це не взаємодія ядер, а їх синтез;*
- г) Перетворення ядер, що не взаємодіють одне з одним.*

2. За характером перетворення, що відбулися в ядрі ядерні реакції поділяються на:

- а) – радіаційне захоплення; – кулонівське збудження; – пружне розсіяння; – дози випромінювання.*
- б) – радіаційне захоплення; – кулонівське збудження; – поділ ядер; – реакції зриву; – ядерний фотоефект.*
- в) – поділ ядер; – реакції зриву; – ядерний фотоефект; – штучна і природна радіоактивність.*
- г) – синтез; – фотоефект; – радіоактивний розпад; – реакції зриву.*

3. Який із законів збереження не справджується, при ядерних реакціях?

- а) Закон збереження імпульсу та моменту імпульсу;*
- б) Закон збереження енергії і кількості теплоти;*
- в) Закон збереження електричного заряду і кількості нуклонів;*
- г) Закон збереження спіна електрона.*

4. Хто у перше здійснив першу ядерну реакцію під дією  $\alpha$ -частинки?

- а) Ейнштейн;*
- б) К'юрі;*
- в) Резерфорд;*
- г) Ньютон.*

5. Як називається ядерна реакція з виділенням енергії?

- а) Ендотермічна;*
- б) Екзотермічна;*
- в) Екзо-ендотермічна;*
- г) Термічна.*

6. Аналіз залежності питомої енергії зв'язку нуклонів у ядрі від його масового числа показує, що можна дістати енергію не тільки при поділі важких ядер, але і із синтезом ядер з числом  $A \leq 50$  легших ядер. Такі реакції називаються:

- a) поділу важких ядер;
- б) закон радіоактивного розпаду;
- в) реакція термоядерного синтезу;
- г) реакція зриву.

7. Першими трансурановими елементами були:

- a) Нептуній і Гелій;
- б) Гелій і Плутоній;
- в) Нептуній і Плутоній;
- г) Радій і Уран.

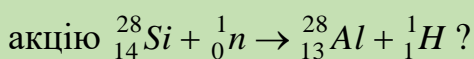
8. Для трансуранових елементів  $Z$  має бути:

- a)  $Z > 92$ ;
- б)  $Z < 92$ ;
- в)  $Z > 90$ ;
- г)  $Z = 90$ .

9. Чому рівна енергія, що виділяється чи поглинається при ядерній реакції?

- a)  $\Delta W = \Delta mc^2$ ;
- б)  $\Delta W = (\sum m_1 - \sum m_2)c^2$ ;
- в)  $\Delta W = \frac{\Delta mc^2}{2}$ ;
- г)  $\Delta W = \hbar\omega$ .

10. Якою мінімальною кінетичною енергією повинен володіти нейтрон, щоби він мав змогу при зіткненні з ядром кремнію  ${}_{14}^{28}\text{Si}$ , викликати ядерну реакцію



- a)  $W = 3\text{MeV}$ ;
- б)  $W = 2\text{MeV}$ ;
- в)  $W = 2.4\text{MeV}$ ;
- г)  $W = 2.5\text{MeV}$ .

---

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

---

Навчальні лабораторні роботи з квантової, атомної та ядерної фізики за-вершують вивчення студентами курсу загальної фізики. Ці роботи спрямовані на поглиблення теоретичних знань, ознайомлення з сучасними технічними засобами і методами вимірювань, а також докладніше вивчення фізичних по-нять, явищ і законів.

Особливістю робіт з квантової фізики є те, що тут студенти працюють з явищами і процесами мікросвіту, які в більшості випадків не підлягають без-посередньому вимірюванню чи спостереженню. Поряд з тим, роботи з атом-ної фізики особливо важливі у зв'язку з ситуацією, що склалась через техно-генну аварію на Чорнобильській атомній станції, яка має надто складні еколо-гічні наслідки. Хоча з того часу пройшло вже багато часу, людство ще не знає всіх наслідків цієї події, як вона вплине на генофонд та здоров'я нації. Тому студенти повинні знати основне обладнання для дозиметрії, вміти ним корис-туватись і аналізувати отримані результати.

### *Підготовка до виконання робіт*

Перед виконанням лабораторної роботи студент повинен:

- опрацювати інструкцію до роботи;
- знати мету виконання роботи та основні її завдання;
- усвідомити основні теоретичні положення і закони, на яких базується виконання роботи;
- якщо самостійне опрацювання матеріалу за літературою, вказаною в ін-струкції, виявилось недостатнім для розуміння суті явищ чи процесів, слід звернутись за консультацією до викладача;
- ознайомитись з робочим місцем та обладнанням, яке використовується в процесі виконання роботи;



- якщо спосіб використання окремого обладнання студенту невідомий, то йому потрібно взяти у лаборанта технічну інструкцію до цього обладнання і опрацювати її; рівень роботи студента з обладнанням оцінює лаборант;
- чітко розмежувати величини, які слід виміряти в ході виконання роботи і величини, які будуть обчислені;
- знати порядок виконання роботи та послідовність операцій.

### *Допуск до виконання робіт*

Допуск до виконання лабораторних робіт дає керівник занять. У співбесіді зі студентом (або бригадою) встановлюється ступінь їх готовності до заняття. Якщо студент не може сформулювати основні положення теорії, на яких базується робота, описати послідовність виконання досліджень, не вміє працювати з обладнанням – то він до виконання роботи не допускається.

Після отримання допуску студенти одержують додатковий інструктаж з техніки безпеки на робочому місці стосовно конкретної роботи, уточнені завдання до роботи, беруть в лаборанта додаткове обладнання чи прилади. Допуск студентів до виконання робіт оцінюється і фіксується в лабораторному журналі.

### *Виконання лабораторних робіт та дотримання вимог техніки безпеки*

При виконанні лабораторних робіт слід дотримуватись таких правил:

1. Дотримуватись розпорядку роботи в лабораторії і правил техніки безпеки, з якими студенти ознайомлені на вступному занятті та при допуску до виконання роботи.
2. Без перевірки викладачем або лаборантом готовності до дії установки і електричної схеми не можна починати вимірювання. Напруга на робочі місця подається лише з дозволу керівника занять чи лаборанта. Самостійно вмикати розподільний щит або змінювати положення перемикачів на ньому забороняється.
3. Не можна брати без дозволу прилади з інших робочих місць.
4. Якщо в процесі виконання роботи виникають неполадки в роботі приладів або обладнання, про це слід негайно повідомити керівника заняття і лаборанта. Самостійно налагоджувати роботу приладів не дозволяється.

5. Забороняється брати і користуватись радіоактивним джерелом без дозволу відповідального за його зберігання (лаборанта).
6. Під час виконання роботи радіоактивне джерело має знаходитись за свинцевим захистом.
7. Категорично забороняється передавати радіоактивне джерело іншим бригадам без дозволу на це лаборанта.
8. В лабораторії, де працюють з радіоактивними джерелами, забороняється вживати їжу та пиття.
9. У випадку руйнування чи розгерметизації радіоактивного захисту чи джерела про це слід негайно повідомити керівника занять і лаборанта.
10. Працюючи з лазерним випромінюванням, уникайте його прямого попадання на відкриті частини тіла і, особливо, очі.
11. Будьте обережні, в роботах використовується висока напруга.
12. Результати вимірювань занести до таблиці, заздалегідь продумавши їх форму, якщо вона не вказана в інструкції.
13. Вимірювання кожної величини проводити не менше трьох разів, щоб звести до мінімуму похибки.
14. Після закінчення експерименту, не розбираючи пристрою, слід обчислити кінцеві результати; якщо вони незадовільні, треба заново провести вимірювання.
15. Обговорити з керівником занять чи лаборантом отримані результати. Вони підписуються викладачем або лаборантом.
16. При захисті лабораторних робіт студент подає короткий письмовий звіт з результатами вимірювань, обчисленими величинами та побудованими графіками, висновками. В процесі захисту він повинен відповісти на поставлені керівником занять питання стосовно лабораторної роботи чи окремих її частин.
17. Рекомендується в кінці заняття звітувати за попередньо виконані лабораторні роботи.
18. Якщо студент не захистив більше трьох виконаних лабораторних робіт, він може бути недопущений до виконання наступних.
19. В кінці кожної роботи міститься 5 контрольних запитань, відповівши на які студент отримує оцінку за п'ятибальною або відповідною шкалою ESTC:

- а) відповівши на одне запитання – «достатньо» – «Е»;
- б) відповівши на два запитання – «задовільно» – «D»;
- в) відповівши на три запитань – «добре» – «С».
- г) відповівши на чотири запитань – «дуже добре» – «В»;
- д) відповівши на всі п'ять запитань – «відмінно» – «А».

### ***Відпрацювання лабораторних робіт***

- Якщо студент не був допущений до виконання робіт через свою невідповідність, або ж пропустив заняття по хворобі чи іншій причині, то відпрацювання пропущених робіт проводиться у дні та години, вказані у графіку роботи лабораторії.
- Студент повинен отримати допуск до заняття, виконати всі дослідження, обробити результати вимірювання і обговорити їх з викладачем чи лаборантом.
- В лабораторному журналі фіксується дата відпрацювання таких занять.

### ***Визначення похибок при вимірюваннях***

Нехай  $N_1, N_2, \dots, N_n$  – результати окремих вимірювань даної величини, а  $n$  – кількість вимірювань. Середнє арифметичне цих результатів  $N_c = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_n}{n}$ , тобто величина найбільш близька до дійсного значення, називається ***середнім значенням***.

Кожне фізичне вимірювання повинно бути повторено декілька разів. Різниця  $\Delta N_1, \Delta N_2, \dots, \Delta N_n$  між середнім значенням  $N_c$  і значеннями  $N_1, N_2, \dots, N_n$ , які отримані при окремих вимірюваннях, тобто:  $N_c - N_1 = \Delta N_1$ ;  $N_c - N_2 = \Delta N_2$ ; ...;  $N_c - N_n = \Delta N_n$  – називають ***абсолютними похибками***, вони можуть бути додатні або від'ємні.

Для отримання ***середньої абсолютної похибки*** беруть середнє арифметичне абсолютних значень (модулів) окремих похибок, тобто  $\Delta N_c = \frac{|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + \dots + |\Delta N_n|}{n}$ . Відношення  $\frac{\Delta N_1}{N_c}, \frac{\Delta N_2}{N_c}, \dots, \frac{\Delta N_n}{N_c}$  називають ***відносними похибками окремих вимірювань***.

Відношення середньої абсолютної похибки результату  $\Delta N_c$  до його середнього значення  $N_c$  дає *середню відносну похибку результату вимірювань*

$$E = \frac{\Delta N_c}{N_c}. \text{ Відносні похибки прийнято виражати в процентах } E = \frac{\Delta N_c}{N_c} \cdot 100\% .$$

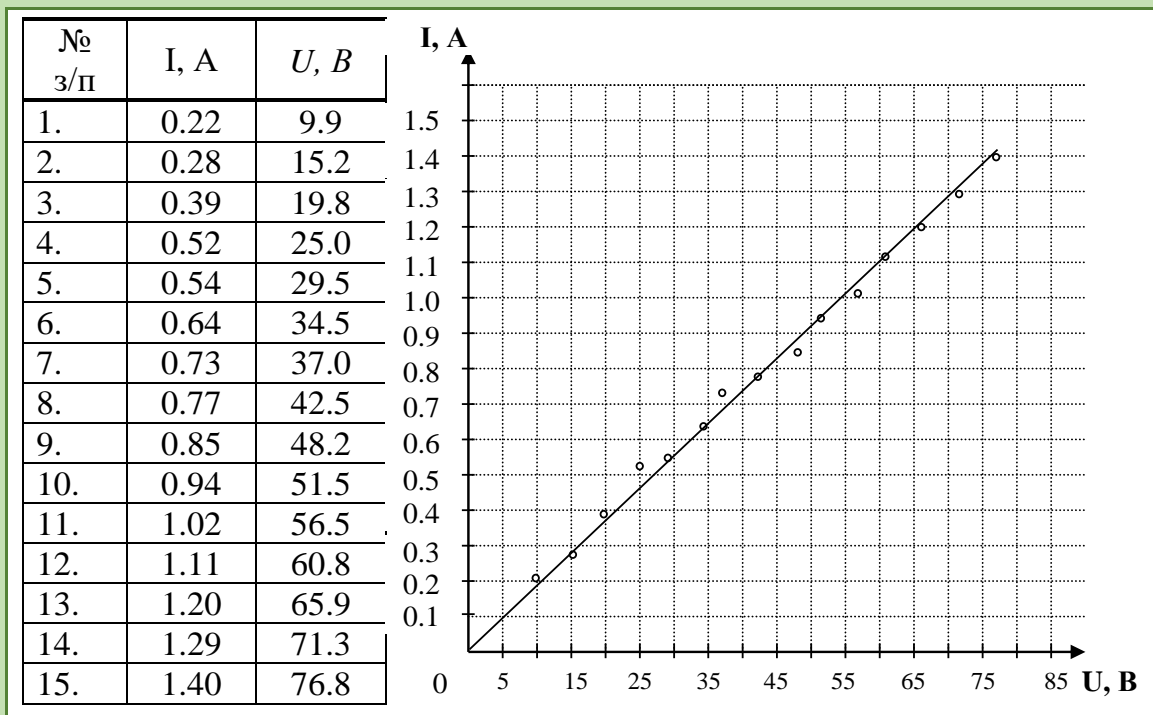
Дійсне значення вимірюваної величини  $N_{\text{дійсне}} = N_c \pm \Delta N_c$ .

### *Побудова графіків при вимірюваннях*

*При побудові графіків слід дотримуватись таких правил:*

1. Графік повинен мати назву – залежність між якими величинами він показує.
2. Позначити осі координат і одиниці вимірювання величин.
3. Вибрати раціональний масштаб осей (прямий однаковий, прямий різний, обернений, логарифмічний, напівлогарифмічний, квадратичний тощо). Вибраний масштаб повинен на графіку зобразити залежність досліджуваних величин прямою лінією. Якщо в роботі вибір масштабу не вказано, зробіть це самі.
4. Графік повинен займати всю площу малюнка.
5. Перед тим як будувати графік, треба вияснити яку функціональну залежність показує цей графік (пряма, крива, гіпербола, парабола і тд.).

**Приклад:** Графік залежності сили струму від напруги



## ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ В ЗАКОНІ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА

**Мета:** навчитись користуватись пірометром, перевірити закон Стефана-Больцмана.

### Теоретична частина

За законом Стефана-Больцмана

$$R_0(T) = \sigma T^4,$$

де  $R_0(T)$  – сумарна потужність випромінювання абсолютно чорного тіла з одиниці поверхні,  $T$  – абсолютна температура цього тіла,  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана.

Якщо випромінювання відбувається з середовища, що має температуру  $T$ , то віддача тілом енергії випромінювання визначається так:  $Q = \sigma(T^4 - T_0^4)$ .

Та обставина, що склад випромінювання і кількість випромінюваної тілом енергії значно залежить від температури, дозволяє шляхом виміру випромінювання розжареного тіла достатньо точно виміряти його температуру. Вимір температури виконують за допомогою пірометра із зникаючою ниткою. Границі виміру температури 800-5000 °С.

Оптичний пірометр (рис. 2), складається із зорової труби, в якій знаходиться еталонна лампочка розжарення  $L$ . Труба  $\Pi$  наводиться на розжарене тіло (вольфрамова пластинка  $N$ ). За допомогою лінзи  $L_1$ , зображення пластинки  $N$  вводиться в площину нитки лампочки  $L$ .

Друга лінза  $L_2$ , яка розміщена в трубі  $O$ , дає збільшене зображення нитки лампочки і поверхні розжареної пластинки. Лампочка  $L$  живиться струмом від акумуляторної батареї  $B$ . Розжарення нитки регулюють реостатом  $R$ , за допомогою кільця  $r$ , що знаходиться на бічній частині пірометра  $\Pi_p$ . Регулю-

ючи реостатом  $R$  величину струму в лампочці  $L$ , можна домогтися зникнення видимості нитки на фоні пластинки.

В цьому випадку температура нитки лампочки і вольфрамової пластинки стане однаковою. При користуванні пірометром порівняння яскравостей нитки та пластинки відбувається в обмеженій області спектру. Тому, для одержання монохроматичного світлового потоку, в трубці  $O$  окуляра розміщено червоний світлофільтр  $K\Phi$ . Температуру нитки відраховують по шкалі на корпусі пірометра. Випромінювання вольфрамової пластинки близьке до випромінювання абсолютно чорного тіла. Для нагрівання вольфрамової пластинки  $N$  її вмикають в коло змінного струму (рис. 1). Змінюючи реостатом  $R_1$  струм в колі пластинки, одержують різну ступінь її розжарення. Потужність, що витрачається на підтримання вольфрамової пластинки в розжареному стані, визначають з показів амперметра  $A$  і вольтметра  $V$ . Прирівнюючи цю потужність з кількістю енергії, що витрачається пластинкою за секунду у відповідності з законом Стефана-Больцмана, одержують:

$$I_1 U_1 = \sigma S (T_1^4 - T_0^4) C$$

де  $S$  – загальна площа поверхні розжареної пластинки,  $C$  – коефіцієнт повної віддачі випромінюючої здатності тіла (вольфрамової пластинки) по відношенню до абсолютно чорного тіла. Звідси:  $[\sigma] = [I_1 U_1] / ([S(T_1^4 - T_0^4)] C)$ .

Для даної роботи:  $S = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ;  $C = 0,6$ .

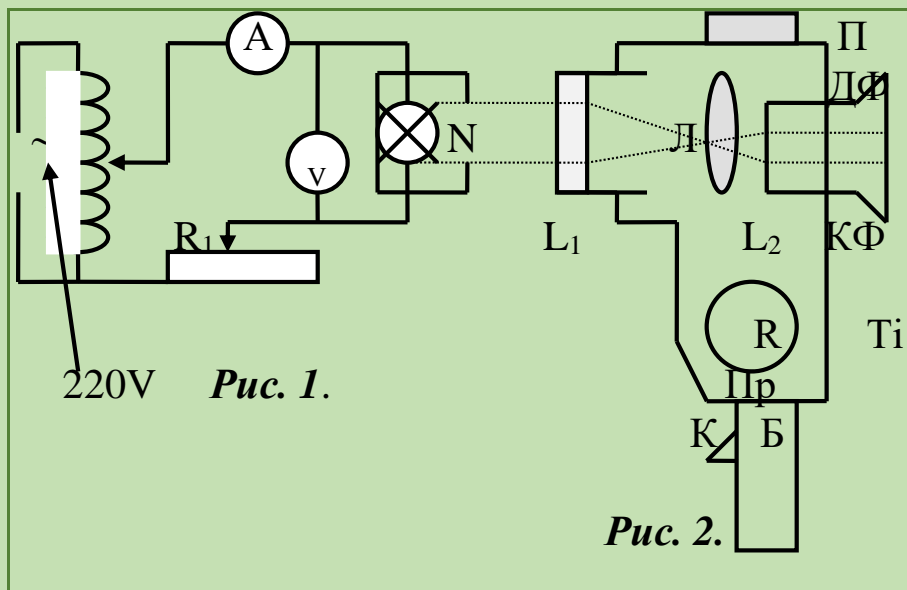
За цією формулою і визначають  $\sigma$ .

### Експериментальна частина

1. Збирають електричне коло (рис. 1) для розжарення вольфрамової платівки  $N$ .
2. Готують оптичний пірометр до проведення вимірів (рис. 2), для чого:
  - а) вводять увесь опір реостата  $R$  пірометра, повертаючи кільце  $r$  вліво до упору.
  - б) поволі повертаючи кільце реостата  $r$  за годинниковою стрілкою, збільшують струм в колі лампочки  $L$  і доводять розжарення нитки приблизно до  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . При цьому світлофільтр  $Д\Phi$  повинен бути введеним.

в) переміщуючи тубус окуляра  $L_2$  домагаються чіткого зображення нитки.

3. До вольфрамової платівки підводять певну напругу  $U_1$  (за вказівкою викладача).
4. Для одержання світла однієї довжини хвилі вводять монохроматичний (червоний  $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$ ) світлофільтр  $K\Phi$ , повертаючи кільце  $СК$ . Ще раз виконують фокусування нитки лампочки  $L$ .



5. Направляючи об'єктив пірометра  $L_1$  на розжарену платівку  $N$  і зміщуючи тубус об'єктива, досягають чіткого зображення платівки.
6. Визначають температуру платівки при даному розжаренні. Для цього змінюють яскравість нитки еталонної лампочки  $L$  поворотом кільця реостата  $R$  до того моменту, коли середня ділянка нитки лампи  $L$  не зникає на фоні розжареної платівки. Роблять відрахунок температури  $T_1$  (по шкалі відрахунку температур від 800 до 1400  $^{\circ}\text{C}$ ).
7. Змінюють покази приладів, що знаходяться в колі вольфрамової платівки (величину струму  $I_1$ , напругу  $U_1$ ), при визначеній температурі  $T_1$  розжарення платівки. За формулою розраховують значення  $\sigma_1$ . Величини  $S$  та  $C$  подані в роботі.
8. Під наглядом викладача збільшують розжарення платівки і знаходять друге значення  $\sigma_2$ , знімаючи відповідні покази  $T_2, I_2, U_2$ .

9. Третє значення знаходять для ще більш високої температури (від 1400 до 2000 °C). Відлік температури ведуть за шкалою 1200-2000 °C пірометра.
10. За значеннями  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  знаходять середнє значення  $\sigma$ .

Всі дані експерименту заносять до таблиці.

$N$	$T_0$	$T_i$	$I_i$	$U_i$	$\sigma_i$	$\sigma_{cp}$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_{cp}$	$\sigma$

$$\Delta\epsilon_{cp} = \Delta\sigma / \sigma_{cp} 100\%, \quad \sigma = \sigma_{cp} \pm \Delta\sigma_{cp}.$$

### Контрольні запитання

1. Яке тіло називається абсолютно чорним? Чи існують такі тіла в природі?
2. Будова та принцип дії пірометра з зникаючою ниткою. Які температури можна визначити за допомогою такого пірометра?
3. Який фізичний зміст сталої в законі Стефана-Больцмана?
4. Як розподіляється енергія абсолютно чорного тіла за різними довжинами хвиль?
5. Що називається яскравісною температурою і чому вона відрізняється від істинної температури досліджуваного джерела?

### Література

1. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Москва; Ленинград, 1959. Т. 3. С. 310-313.
2. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. 1963. С. 321-325.
3. Чепуренко В.Г. Руководство к лабораторным работам по физике. Киев, 1963. С. 265-267.



## Робота № 2

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ІНТЕГРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ

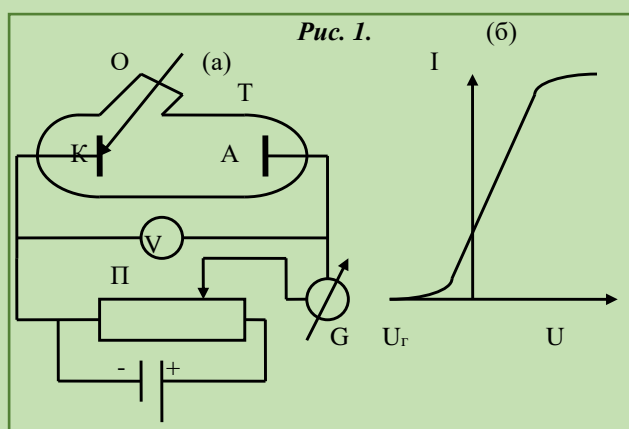
**Мета:** дослідити ВАХ вакуумного фотоелемента.

### Теоретична частина

У 1887 р. Г. Герц помітив, що розряд між металевими електродами стає інтенсивнішим, якщо їх освітлювати електричною дугою. Це явище отримало назву фотоелектричного ефекту. Після відкриття електрона (1897 р.) Ф. Ленард і Дж. Томсон у 1898 р. довели експериментально, що зовнішній фотоелектричний ефект являє собою вивільнення електронів з металевих катодів під дією світла.

Фотоелектричний ефект як самостійне фізичне явище вивчав О.Г. Столетов у 1888-1890 рр. Він виявив, що при освітленні ультрафіолетовими променями зазнають розряду лише тіла, заряджені негативно. Схема його дослідів показана на рис. 1 (а). Світло через кварцове вікно  $O$  падає на

катод  $K$ . Катод і анод розміщені у вакуумній трубці  $T$ . Напряга «катод-анод» змінюється потенціометром  $\Pi$ . Вольт-амперна характеристика пристрою показана на рис. 1 (б). При опроміненні катода монохроматичним світлом, фотострум існує не лише, коли  $\varphi_a - \varphi_k > 0$ , але й при  $\varphi_a - \varphi_k < 0$ . Він припиняється для даної речовини катода лише при певній величині від'ємної різниці потенціалів  $\varphi_a - \varphi_k = U_z$ , яка називається гальмівною напругою. Ця напруга не залежить від інтенсивності світла. Сила фотоструму зростає із збільшенням різниці потенціалів і при певному значенні напруги досягає насичення.



Основні закономірності фотоэффекту:

- при сталому спектральному складі світла фотострум насичення пропорційний світловому потоку, що падає на катод;
- початкова кінетична енергія вивільнених світлом електронів лінійно залежить від частоти світла і не залежить від його інтенсивності;
- фотоэффект не виникає, якщо частота світла менша певної характерної для даного металу величини;
- фотоэффект – явище безінерційне, тобто з припиненням освітлення поверхні він припиняється.

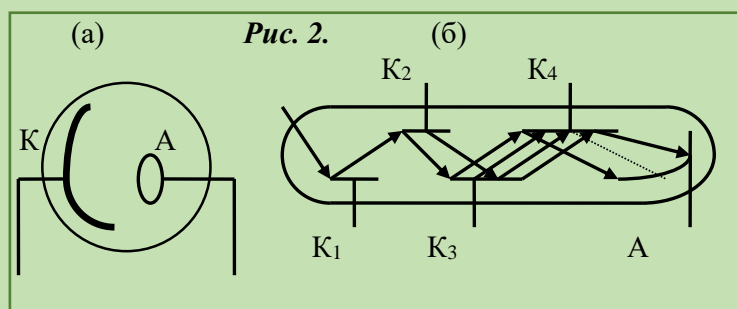
Квантова модель фотоэффекту була пояснена А. Ейнштейном у 1905 р. застосуванням закону збереження енергії до взаємодії фотона з електроном – рівняння фотоэффекту:

$$h\nu = A + (mv^2) / 2, \quad (1)$$

де:  $h\nu$  – енергія кванта світла;  $A$  – робота виходу електрона з металу,  $(mv^2) / 2$  – кінетична енергія фотоелектрона. На основі цього було пояснено існування «червоної межі» фотоэффекту – мінімальної частоти світла, яка викликає фотоэффект (при цьому кінетична енергія фотоелектронів рівна 0).

Прилади, в яких фотоэффект використовується для перетворення енергії випромінювання в електричну енергію, називаються фотоелементами. Залежно від виду фотоэффекту створено фотоелементи з зовнішнім фотоэффектом (вакуумні і газонаповнені) та внутрішнім (фоторезистори, вентильні фотоелементи, сонячні елементи).

Фотоелементи з зовнішнім фотоэффектом являють собою скляні балони, всередині яких розміщено фотокатод і анод (рис. 2, а). Фотокатодом  $K$  є шар лужного або лужноземельного металу, нанесеного на основу з срібла. Анод  $A$  має форму стержня, кульки або кільця. Наявність інертного газу в балоні дає можливість збільшити чутливість пристроїв у 5-10 разів порівняно з вакуумними. Для під-

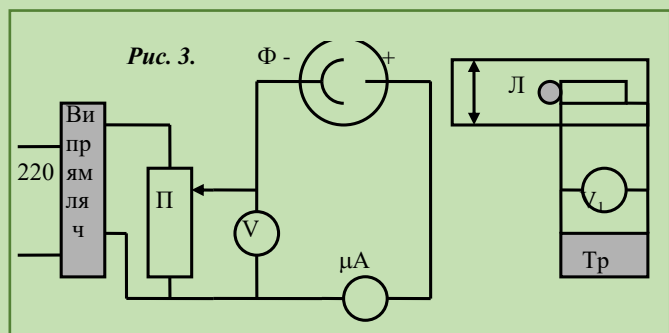


силення фотоструму часто користуються фотопомножувачами (рис. 2, б). Їх дія ґрунтується на явищі вторинної електронної емісії. Кількісно вона характеризується коефіцієнтом вторинної емісії  $\sigma = n_2/n_1$  (відношення кількості вибитих електронів до кількості падаючих).

### Експериментальна частина

Визначити характеристики фотоелемента:

- вольт-амперну інтегральну і спектральну;
  - питому чутливість інтегральну і спектральну;
  - світлову характеристику;
  - спектральну характеристику.
1. Зібрати електричне коло за схемою рис. 3.
  2. (а) зняти інтегральну (для білого світла) вольт-амперну характеристику. Побудувати графік  $I = f(U)$ ; (б) зняти спектральну вольт-амперну характеристику для даного світлофільтра. Світловий потік при цьому підтримувати сталим.
  3. Знайти питому інтегральну чутливість фотоелемента за графіком вольт-амперної характеристики для білого світла для її зростаючої частини кривої за формулою:



$$K = \Delta I / (\Phi \Delta U) \text{ (}\mu\text{A / лм В)}.$$

де:  $\Delta I$  – зміна фотоструму викликана зміною напруги на  $\Delta U$  при сталому світловому потоці  $\Phi$ . Світловий потік  $\Phi$  знаходять за співвідношенням:

$$\Phi = \Gamma (S / r^2).$$

де:  $\Gamma$  – сила світла джерела, яке освітлює віконце фотоелемента (в цій роботі  $\Gamma = 20 \text{ кд}$  при напрузі на лампі освітлювача 6 В),  $r$  – віддаль від фотоелемента до джерела світла (задає керівник занять),  $S$  – площа віконця фотоелемента ( $d = 3,3 \text{ см}$ ).

4. Визначити спектральну чутливість фотоелементу аналогічно інтегральній чутливості, використовуючи світлофільтр, визначений керівником занять:  $K_\lambda = \Delta I / \Phi_\lambda \Delta U$ .
5. Змінюючи віддаль  $r$ , отримати світлову характеристику і побудувати графік залежності фотоструму  $I$  від величини світлового потоку  $\Phi$  при постійній напрузі  $U$  на фотоелементі.
6. Користуючись світлофільтром, побудувати графік залежності величини фотоструму фотоелементу від довжини світлової хвилі, тобто спектральну характеристику, виконуючи вимірювання при напрузі, коли встановлюється струм насичення.

Таблиця

*Світлофільтри пропускають світло з такими довжинами хвиль та коефіцієнтами зменшення світлового потоку  $K$ :*

Колір світлофільтра	$\lambda$ , мкм	$K$
Червоний	0,70	0,01
Жовтий	0,60	0,60
Зелений	0,50	0,33
Голубий	0,45	0,05
Синій	0,43	0,02
Фіолетовий	0,40	0,01

7. Результати вимірювань подати у формі таблиць.

### **Контрольні запитання**

1. Яке явище називається фотоефектом? Сформулювати чотири правила Столетова для фотоефекту.
2. Що називається вольт-амперною характеристикою фотоелемента?
3. Що таке червона межа фотоефекту? Записати закон збереження енергії для фотоефекту.
4. Що таке темновий струм фотоелементу? Чому він виникає?

5. Чому для катодів фотоелементів використовуються лужні метали? Навести приклади використання фотоелементів.

### **Література**

1. Кучерук І.М., Дущенко В.П. Загальна фізика, Оптика, квантова фізика. Київ: Вища школа, 1991.
2. Корсунский М.И. Оптика. Строение атома. Атомное ядро. Москва: Наука, 1967.
3. Кортнев А.В. Практикум по физике. Москва, 1963.
4. Фізичний практикум / за ред В.П. Дущенко. Киев: Вища школа, 1984. Ч. 2.

## *Робота № 3*

# **ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ЛАМП**

**Прилади:** люмінесцентна лампа, дросель, стартер, амперметр, вольтметр, люксметр, рулетка, провідники.

### **Теоретична частина**

Світіння різних речовин, що виникає внаслідок попереднього опромінення, називається фотолюмінесценцією. Видима люмінесценція виникає при опроміненні речовин світлом з більшими квантами енергії, наприклад, ультрафіолетовим випромінюванням. Люмінесценція, що виникає за рахунок енергії квантів рентгенівського випромінювання, називається рентгенолюмінесценцією. Якщо світіння виникає внаслідок опромінення швидкими електронами, то таке випромінювання називається катодолюмінесценцією (екрани телевізорів, осцилографів, моніторів, трубки Брауна). Люмінесценція, що відбувається при хімічних реакціях, називається хемілюмінесценцією. Якщо ж такі процеси мають місце в живих організмах, то це буде біоломінесценція.

Люмінесценція тіл суттєво відрізняється від температурного (теплого) випромінювання нагрітих тіл. Розподіл енергії в спектрі температурного випромінювання цілком залежить від температури тіла і для різних тіл не залежить від їх хімічного складу. При наявності люмінесценції випромінювання має місце і для тіл у холодному стані, яке при зниженні температури іноді посилюється. Розподіл енергії в спектрі люмінесценції майже не залежить від температури і визначається лише природою тіл. Тому люмінесценцію часто використовують для хімічного аналізу і технічного контролю продукції.

У явищах фотолюмінесценції, як це встановив Стокс, світло, що її збуджує, завжди має коротші довжини хвиль порівняно з випромінюванням, що показано на рис. 1. Виняток складає резонансне випромінювання, яке властиве газам і парам і називається резонансною люмінесценцією.

В цьому випадку випромінюється та ж довжина хвилі, що й поглинається. Основні закономірності люмінесценції докладно вивчені С.І. Вавіловим. Він ввів поняття квантового виходу люмінесценції, що є енергетичною і квантовою характеристикою люмінесцентної здатності тіл.

Енергетичний вихід люмінесценції визначається подібно до коефіцієнта корисної дії через відношення енергії, яку випромінює речовина, до енергії, яку вона поглинула. Квантовий вихід – це відношення кількості квантів, що випромінюються, до того числа квантів, які були поглинуті.

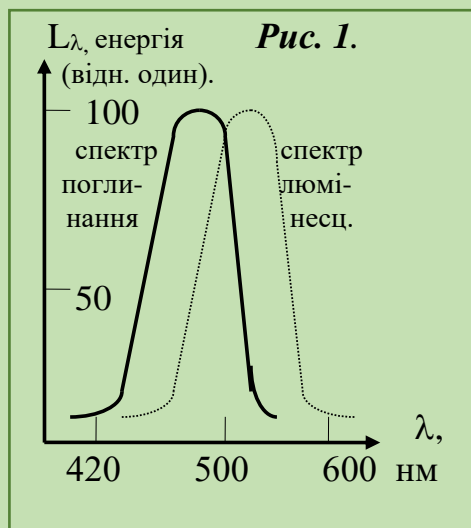
Вивчення С.І. Вавіловим виходу люмінесценції привело до встановлення важливої закономірності: енергетичний вихід зростає із збільшенням довжини хвилі проміння, яке збуджує люмінесценцію, а квантовий вихід залишається сталим. Ця властивість люмінесценції називається законом Вавілова.

Закон Вавілова має наукове і практичне значення. Він покладений в основу підвищення світловіддачі люмінесцентних джерел світла.

За характером і природою випромінювання джерела світла можна поділити на теплові, газосвітні та люмінесцентні.

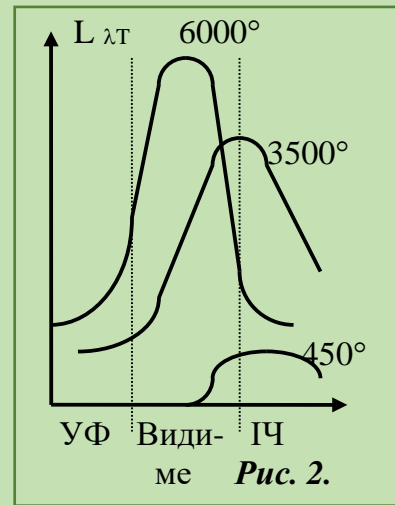
Теплові джерела випромінювання (Сонце, електричні лампи розжарення) мають суцільний спектр випромінювання. Електричні лампи розжарення мають розподіл енергії в спектрі випромінювання, близький до спектра випромінювання чорного тіла і підлягають тим самим закономірностям.

Спектр випромінювання газосвітних джерел складається з кількох окремих спектральних ліній і світловий потік буде забарвлений. Тому такі газосвітні джерела застосовуються лише для сигналізації та рекламного освітлення.



Ці джерела виготовляють у вигляді трубок, заповнених інертним газом. На кінцях трубок впаяні електроди для підведення високої напруги.

Якщо ККД виразити як світловіддачу, тобто як відношення енергії, що припадає на видиме проміння, до всієї енергії, що затрачена, то він буде дуже малим для ламп розжарення (до 3%). Це стає зрозумілим, коли розглянути криві розподілу енергії в спектрі розжареного тіла при різних температурах, показані на рис. 2.



Газосвітні джерела можуть мати ККД, близький до 90%, наприклад, натрієві лампи. Колірність газосвітних джерел виправляється за допомогою люмінесценції особливих кристалічних порошоків – люмінофорів. Такі джерела називаються люмінесцентними і їх є багато типів.

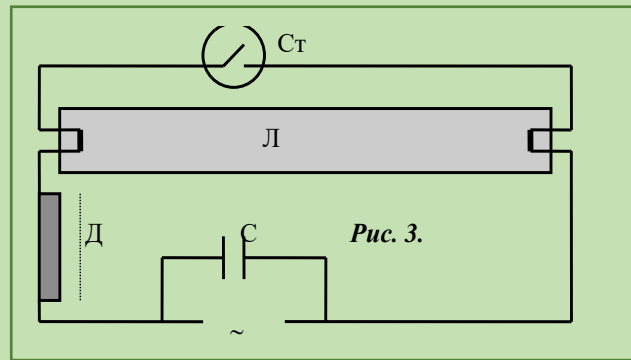
Серед них з метою освітлення частіше всього використовують ртутні лампи, заповнені неоном чи аргоном при низькому тиску і парами ртуті. Всередині таких ламп на стінки нанесено дрібнокристалічний люмінофор. За своїми світловими характеристиками вони істотно відмінні від звичайних ртутних ламп, а саме:

- спектральний склад випромінювання виправлено за рахунок світіння люмінофорів, завдяки якому розподіл енергії в спектрі випромінювання стає близьким до розподілу в спектрі денного розсіяного світла;
- ККД цих ламп вищий, ніж ртутних, тому що ультрафіолетове випромінювання перетворюється за допомогою люмінофора у додаткове видиме світіння ламп;
- менше позначається стробоскопічний ефект за рахунок фотолюмінесценції люмінофорів, які мають достатню світлову інерцію (післясвітіння).

Люмінесцентні лампи вмикаються в електричне коло послідовно з баластним опором (дроселем Д), який призначений для обмеження сили струму (рис. 3). Лампа, ввімкнена без такого опору виходить з ладу.



Для запалення лампи використовується неоновая лампочка тліючого розряду (стартер Ст), один з електродів якої являє собою термобіметалеву пластинку. Під дією тліючого розряду електроди стартера нагріваються, електрод з термобіметалу



згинається і дотикається до другого електрода. Внаслідок цього стартер закорочується і катоди лампи розжарюються струмом, який проходить через них. В цей момент часу тліючий розряд припиняється, електроди стартера охолоджуються, випрямляються і розмикають коло для розжарення електродів лампи. При цьому виникає імпульс напруги, який створює дуговий розряд у лампі, після чого вона починає працювати. Конденсатор С служить для уникнення впливу лампи на радіоприлади.

Застосування дроселя як баластного опору знижує коефіцієнт потужності лампи до 0,5-0,6. Для підвищення коефіцієнта потужності до 0,8-0,9 потрібно паралельно підключити компенсуючий конденсатор ємністю (4-6) мкФ. Люмінесцентна лампа має в 4-5 разів більшу світловіддачу порівняно з електричними лампами розжарення.

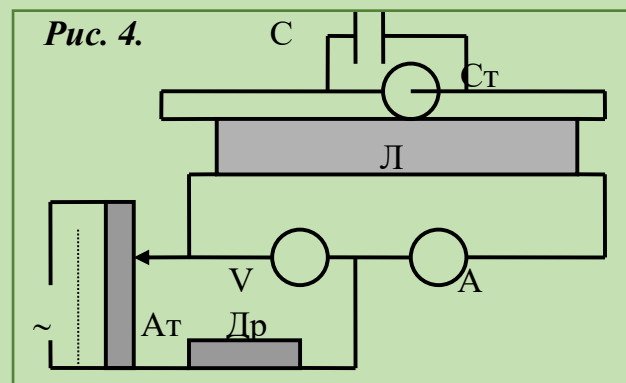
### Експериментальна частина

1. Зібрати схему за рис. 4. Визначити потужність, яку споживає лампа:

$$P = UI \cos 60^\circ.$$

2. На віддалі  $R = 5 \text{ м}$  за допомогою люксметра визначити освітленість  $E$  і обчислити світловий потік за формулою:  $\Phi = 9,2 E R^2$ . (Еквівалент світлового потоку для максимуму чутливості людського ока  $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$  складає  $0,0016 \text{ Вт/лм}$ ).

3. Обчислити світлову віддачу лампи:  $\eta = \Phi / P$ .



4. Змінюючи напругу, що подається на лампу за допомогою регулятора напруги (автотрансформатора  $A_t$ ), побудувати графік залежності світло-віддачі лампи від споживаної потужності.

### **Контрольні запитання**

1. В чому полягає суть законів люмінесценції (закони Стокса, Вавілова)?
2. Як побудована люмінесцентна лампа?
3. Пояснити принцип роботи лампи.
4. Сформулюйте основні характеристики люмінесцентних ламп.
5. Які переваги люмінесцентних ламп над лампами розжарення?

### **Література**

1. Князев С.И. Физический практикум по оптике.
2. Кучерук І.М., Дущенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. Київ: Вища школа, 1991. 463 с.

## Робота № 4

# ВИВЧЕННЯ ПОГЛИНАННЯ $\gamma$ -ВИПРОМІНЮВАННЯ В РЕЧОВИНІ

**Застереження. Будьте обережні:**

- До трубки лічильника підведено високу напругу;
- Вам доведеться працювати з джерелом радіоактивного випромінювання.

**Мета:** визначити коефіцієнт поглинання  $\gamma$ -променів в металі; знайомство з методами реєстрації  $\gamma$ -випромінювання.

**Обладнання:** радіоактивне джерело, лічильник Гейгера-Мюллера, набір металевих пластинок, мікрометр (штангенциркуль).

### Теоретична частина

$\gamma$ -випромінювання являє собою короткохвильове електромагнітне випромінювання. З точки зору квантової теорії – це потік фотонів, енергія і імпульс яких визначається з виразів:

$$E = h\nu = hc / \lambda; p = h\nu / c. \quad (1)$$

$\gamma$ -випромінювання виникає в процесі переходу ядер з одного енергетичного стану в інший. Ядро, як і атом, є квантово-механічними системами зі сталим набором енергетичних рівнів. Знаходячись в основному стані, ядро не виявляє радіоактивності, так само, як і незбуджений атом не випромінює оптичних фотонів.

В процесі радіоактивного розпаду, при взаємодії ядер з сильним кулонівським полем, при ядерних реакціях ядра можуть переходити в збуджений стан. Найбільш імовірним процесом, який гасить збудження ядра, є випромінювання  $\gamma$ -променів. Енергія  $\gamma$ -кванта рівна різниці енергій збудженого і нижчого енергетичного стану. Це подібне до випромінювання оптичного фотона

збудженим атомом. Різниця є лише в значеннях енергій: для атома це кілька  $eV$ , для ядра – сотні тисяч  $eV$ .

При проходженні випромінювання через речовину відбувається ослаблення його інтенсивності в результаті взаємодії з атомами речовини. Ступінь взаємодії визначається, з одного боку, властивостями речовини (її густиною, розмірами атомів тощо), а з другого – властивостями самого випромінювання.

Найбільш сильно взаємодіють з речовиною масивні  $\alpha$ -частки, що мають електричний заряд і їх проникна здатність найменша.  $\gamma$ -промені – це потік незаряджених фотонів, які не мають маси спокою. Вони найменше взаємодіють з речовиною і тому мають пар в полі ядра.

При фотоефекті енергія  $\gamma$ -кванта цілком поглинається атомом, причому один з електронів атома стає вільним і отримує деяку кінетичну енергію. Ймовірність цього процесу велика лише при близьких значеннях енергії кванта і енергії зв'язку електрона в атомі. Енергія ж  $\gamma$ -квантів в порівнянні з фотонами оптичного діапазону дуже велика. Тому в фотоефекті можуть приймати участь, з одного боку тільки електрони найглибших внутрішніх оболонок атома, а з другого  $\gamma$ -кванти найменшої енергії. При збільшенні енергії  $\gamma$ -променів ймовірність фотоефекту швидко зменшується.

В процесі поглинання  $\gamma$ -квантів з утворенням електрон-позитронної пари  $e^+ + e^-$  енергія кванту витрачається на утворення цих двох часток і на передачу їм кінетичної енергії. Мінімально необхідна для цього енергія складає  $2m_0c^2$ , тобто трохи більше  $1 MeV$ , так що цей процес має значення лише для  $\gamma$ -променів дуже великої енергії.

В широкому діапазоні середніх енергій  $\gamma$ -квантів основну роль в послабленні інтенсивності  $\gamma$ -променів відіграє ефект Комптона: розсіювання  $\gamma$ -квантів на вільних або слабо зв'язаних з атомами електронах. В результаті цього процесу замість первинного  $\gamma$ -кванту з'являється розсіяний  $\gamma$ -квант, що летить в іншому напрямі, причому частину енергії одержує електрон віддачі. Після ряду зіткнень квант втрачає більшу частину своєї енергії і, в кінці кінців, поглинається.

Взаємодія фотонів з частинками речовини носить статистичний характер: кількість актів взаємодії пропорційна наявній кількості квантів (інтенси-

вності випромінювання) і кількості частинок, здатних до взаємодії. Тому зміна (зменшення) інтенсивності випромінювання  $dI$  в малому шарі товщини  $dx$  пропорційна товщині шару та інтенсивності падаючого на цей шар випромінювання  $I$ :

$$I = -\mu I dx. \quad (2)$$

Коефіцієнт  $\mu$  називається коефіцієнтом ослаблення або коефіцієнтом поглинання. Інтегруючи (2) з урахуванням початкових умов ( $I = I_0$  при  $x = 0$ ), одержимо:

$$I = I_0 e^{-\mu x}; \mu = (1/x) \ln(I_1/I_0). \quad (3)$$

Експоненційну залежність (3) зручно зображати в напівлогарифмічних координатах, відкладаючи по осі абсцис товщину поглинаючого шару, а по осі ординат  $\ln(I/I_0)$ . За таким графіком легко знайти коефіцієнт поглинання  $\mu$ .

У випадку переваги комптонівського розсіяння зручно користуватись масовим коефіцієнтом послаблення:  $\mu' = \mu / \rho$ , де  $\rho$  – густина речовини. Він характеризує послаблення  $\gamma$ -променів одиницею маси речовини. Оскільки ефект Комптона обумовлений зіткненнями квантів з зовнішніми електронами атомів, то послаблення, передусім, залежить від концентрації електронів. Але концентрація електронів в речовині пропорційна густині речовини, тому в цьому випадку коефіцієнт  $\mu'$  не повинен залежати від роду речовини.

### Реєстрація $\gamma$ -випромінювання

Заряджена частка (наприклад  $\alpha$ - чи  $\beta$ -), яка швидко рухається, завдяки існуючому поблизу неї електричному полю, здатна виривати електрони з атомів і молекул газу, утворюючи певне число іонів.  $\gamma$ -промені, які не мають заряду, нездатні викликати іонізацію безпосередньо. Проте, вище ми впевнились, що при всіх видах їх взаємодії з речовиною, утворюються електрони, які мають значну енергію. Іонізація, що викликається цими вторинними електронами, і дає можливість реєструвати  $\gamma$ -промені.

## Опис експериментального пристрою

Прилад для реєстрації складається з газорозрядного лічильника Гейгера-Мюллера з блоком живлення і перерахунковим механізмом, який підсилює і підраховує імпульси. Кількість імпульсів, зареєстрованих приладом за одиницю часу, пропорційна інтенсивності випромінювання.

## Експериментальна частина

**Завдання 1.** Визначення фону.

Ввімкніть радіометр Б-2 і дайте йому прогрітись 3-5 хв. За показами лічильника, який входить до складу приладу і за допомогою секундоміру визначте фон  $n_f$ , тобто кількість імпульсів за хвилину, які обумовлені космічними променями і природною радіоактивністю повітря:  $n_f = N / t$ . Відрахуйте не менше 500 імпульсів. В ході роботи не чіпайте руками трубку лічильника, до якої підведено напругу 500 В.

**Завдання 2.** Визначення коефіцієнта ослаблення  $\gamma$ -випромінювання металами.

Встановіть радіоактивний препарат на відстані 25-30 см збоку від лічильної трубки. Розмістіть між препаратом і трубкою спочатку одну, а потім дві, три, і т.д. до 10 пластин алюмінію. Кожен раз підраховуйте кількість імпульсів за хв. Товщину пластин вимірюйте мікрометром або штангенциркулем. Товщину збільшуйте до тих пір, поки швидкість підрахунку не наблизиться до фонового значення. За отриманими результатами побудуйте графік у напівлогарифмічному масштабі:

$$\ln n(x) = f(x).$$

За нахилом отриманої кривої визначте коефіцієнт  $\mu$ .

**Завдання 3.** Визначення коефіцієнта поглинання для одиничних платівок з латуні, міді, свинцю. Розрахунок масового коефіцієнта поглинання.

Виміри проведіть так, як в завданні 1. Коефіцієнт поглинання розрахуйте за формулою (3). Значення густини речовин візьміть із таблиць фізичних величин.

## Контрольні запитання

1. Вкажіть основні властивості  $\gamma$ -фотонів. Чим обумовлюється поглинання  $\gamma$ -променів в речовині?
2. Яку мінімальну енергію повинен мати  $\gamma$ -квант, щоб з'явилась можливість утворення електрон-позитронної пари?
3. Перелічіть механізми утворення  $\gamma$ -фотонів.
4. Чому з трьох головних видів  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -радіоактивного випромінювання  $\gamma$ -промені мають найбільшу проникаючу здатність?
5. Яка будова лічильників Гейгера і Гейгера-Мюллера?

## Література

1. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Еткін В.С. Курс загальної фізики: Оптика і атомна фізика. Москва, 1981. Гл. 16.
2. Детлаф А.А., Яворський Б.М. Курс фізики. Т. 3.
3. Широков Ю.М., Юдін Н.П. Ядерна фізика. Москва, 1972. Гл. VII, IX. П. 4.
4. Лабораторний практикум з фізики / під ред. Е.М. Гершензона, Н.Н. Малова. Москва, 1985. С. 265.

## *Робота № 5*

# **ВИЗНАЧЕННЯ ФОНУ КОСМІЧНОЇ РАДІАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛІЧИЛЬНИКА ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА**

**Застереження! Будьте обережні. В роботі використовується висока напруга (до 1000 В).**

**Мета:** навчитися використовувати комплект приладів для вимірювання радіоактивних випромінювань.

**Завдання:** а) вивчити інструкцію по обслуговуванню комплекту приладів для вивчення радіоактивних випромінювань; б) визначити фон лічильника при різній напрузі.

### **Теоретична частина**

1. Лічильник Гейгера-Мюллера.
2. Зони роботи лічильника на окремих ділянках вольтамперної характеристики.

Лічильною характеристикою лічильника називають залежність числа зареєстрованих частинок (імпульсів) від напруги на лічильнику при сталому джерелі радіоактивного випромінювання.

Фон лічильника – це середня швидкість лічби (кількість імпульсів за одиницю часу), якщо радіоактивні джерела відсутні. Взагалі кажучи, фон обумовлений космічним випромінюванням.

Відкриття радіоактивності було в певній мірі викликане відкриттям рентгенівських променів у 1895 р. Випромінювання рентгенівських променів вперше помітили при бомбардуванні скляних стінок розрядної трубки катодним промінням (дослідження проводили Іван Пулюй та Вільгельм Рентген). Найефективнішим результатом такого бомбардування було інтенсивне зелене свічення скла (люмінесценція). Ця обставина навела на думку, що рентгенів-



ське проміння є продуктом люмінесценції і супроводить будь-яку люмінесценцію, наприклад, збуджену світлом.

Дослідну перевірку цього твердження виконував Беккерель. Він збуджував здатні до люмінесценції речовини світлом, а потім підносив їх до загорнутої в чорний папір фотопластинки. Надіявся виявити почорніння фотопластинок після проявлення. З усіх випробуваних Беккерелем речовин почорніння емульсії спричиняла лише сіль урану.

Після відкриття Беккереля було проведено багато дослідів (Резерфорд, Содді, Кюрі). Виявлено, що торій, полоній, радій і актиній також дають проникаюче випромінювання. Всі вони виявились похідним продуктом урану чи торію. Атоми цих речовин нестабільні. Через певний час (залежно від періоду піврозпаду) вони перетворюються в нову речовину, створюючи проникаюче випромінювання. Ця нова речовина, в свою чергу, теж радіоактивна і процес продовжується до утворення стабільної структури.

Вивчаючи радіоактивність, впевнюємось у тому, що промені випускаються атомними ядрами.  $\alpha$ - і  $\beta$ -промені відхиляються в електричному і магнітному полях,  $\gamma$ -промені не мають електричного заряду.  $\alpha$ -частки повністю поглинаються папером,  $\beta$ -частки – кількома міліметрами алюмінію, а  $\gamma$ -промені проходять через блок свинцю в кілька сантиметрів.

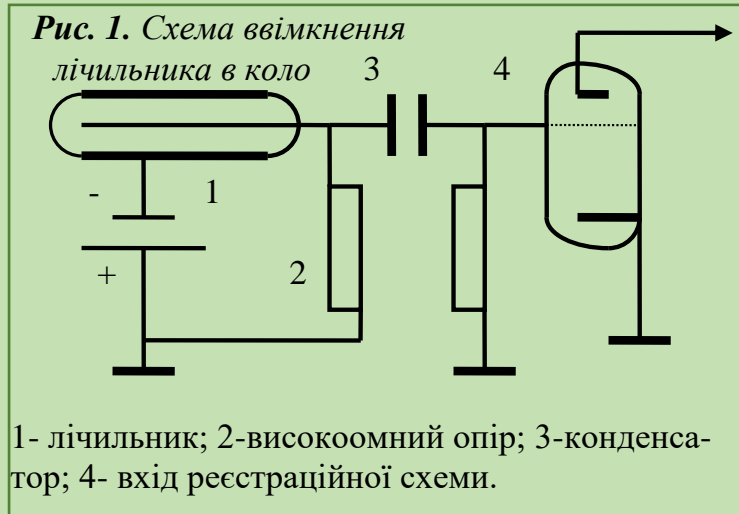
Для вивчення радіоактивного випромінювання використовуються прилади, які називаються лічильниками заряджених часток. В залежності від принципу дії, вони можуть бути поділені на 4 групи:

- іонізаційні, до яких належать пропорційні та лічильники Гейгера-Мюллера;
- напівпровідникові;
- сцинтиляційні;
- черенковські.

За їх допомогою вивчаються космічні промені, штучна і природня радіоактивність, поглинання часток в речовині.

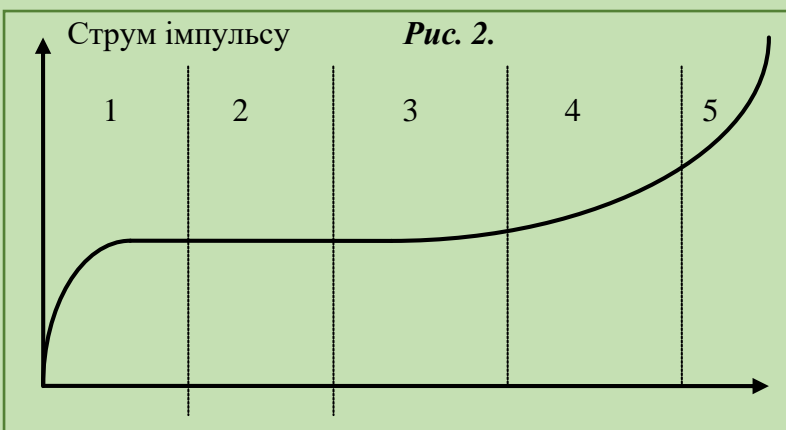
Розглянемо детальніше першу групу лічильників. За будовою лічильник являє собою циліндричний конденсатор, в якому внутрішнім електродам є

металева нитка діаметром до 0,2 мм, а зовнішнім – металевий циліндр діаметром до 2 см. Нитка оголена, але в місцях вводу ретельно ізолювана і заземлена через опір  $10^9$  Ом. Обидва електроди поміщені в скляний балон, заповнений розрідженим газом (азот, водень) (рис. 1.). Оскільки газ в трубі є діелектриком, то при напрузі, недостатній для його пробою і у відсутності радіоактивного випромінювання, струму в колі немає. Якщо на циліндричний електрод подати значний від'ємний потенціал (1000-1500 В), то поблизу нитки виникне область сильного



електричного поля. Коли радіоактивна частка пролітає в просторі між електродами, то вона викличе іонізацію атомів газу. Утворені електрони та іони під дією поля будуть рухатись до електродів. В колі лічильника виникне короткочасний імпульс струму. Лічильники дають можливість вимірювати струм до  $10^{-20}$  А, що відповідає появі кількох електронів за хвилину. Найбільше значення струму імпульсу не завжди пропорційне напрузі на лічильнику, тобто

не визначається законом Ома, а залежить від режиму роботи лічильника. За характером окремих ділянок вольт-амперної характеристики лічильника (рис. 2) можна визначити різні режими його роботи.



не визначається законом Ома, а залежить від режиму роботи лічильника. За характером окремих ділянок вольт-амперної характеристики лічильника (рис. 2) можна визначити різні режими його роботи.

### 1. Ділянка роботи в режимі іонізаційної камери (ділянка 1)

Спочатку, із збільшенням напруги струм лінійно зростає. Якщо напруга незначна, то не всі утворені іонізатором іони досягають електродів – частина їх рекомбінує. Із збільшенням напруги все більше і більше іонів і електронів

встигає долетіти до електродів. Настає насичення, тобто подальше збільшення напруги до  $U_p$  не приводить до зростання струму. Внаслідок цього можна встановити, які частки потрапляють в прилад, оскільки вони утворюють різне число пар іонів. Наприклад,  $\alpha$ -частка може утворити десятки тисяч пар іонів, а швидка космічна частка – лише декілька пар. Тому цей режим роботи – це звичайна іонізаційна камера.

## **2. Ділянка пропорційної роботи (ділянка 2)**

Якщо далі збільшувати напругу від  $U_p$  до  $U^*$ , то кінетична енергія вторинних електронів зростає настільки, що вони здатні викликати ударну іонізацію. На цій ділянці імпульс струму, який виникає внаслідок ударної іонізації, носить назву газового підсилення.

## **3. Ділянка обмеженої пропорційності (ділянка 3)**

Збільшуючи напругу на електродах до  $U_g$ , помічаємо, що пропорційність між імпульсом струму і первинною іонізацією порушується. Цей режим характеризує несамостійний розряд.

## **4. Ділянка Гейгера-Мюллера (ділянка 4)**

Ця ділянка являє собою якісно новий режим, який характеризується довільним розрядом, що починається при попаданні в лічильник частки і дозволяє реєструвати великі імпульси за допомогою вимірювальних приладів. Щоб зафіксувати наступну частку, необхідно погасити розряд, який виник попередньо, тобто підготувати лічильник до наступної роботи. Є два способи погашення розряду:

- в несамогасних лічильниках в коло вмикається опір до  $10^9$  Ом і відбувається падіння напруги, потенціал аноду зменшується і лічильник гасне;
- самогасні лічильники заповнюються спеціально підібраною сумішшю багатоатомних газів.

Ця ділянка найбільш зручна для визначення кількості випромінюваних часток.

## 5. Ділянка неперервного розряду (ділянка 5)

На цій ділянці розряд не може бути погашений ніяким методом.

### Вимоги техніки безпеки в роботі з радіоактивними речовинами.

1. Отвір виходу радіоактивних променів має бути повернутим від експериментатора і бути подалі від нього.
2. Найбільш небезпечним є  $\gamma$ -випромінювання. Межа рентгенівського і  $\gamma$ -випромінювання не повинна перевищувати 0,017 рентгена за 7-ми годинний робочий день.
3. Небезпечним є попадання в організм радіоактивного ізотопу, особливо  $\alpha$ -активного типу, тому:
  - під час виконання роботи забороняється їсти, пити, курити;
  - відкриті препарати брати лише пінцетами;
  - після закінчення роботи слід ретельно вимити руки з милом.
4. Стежити за тим, щоб свинцевий домок з радіоактивним речовинами був закритим; запобігати забрудненню робочого місця радіоактивними ізотопами.
5. По закінченню роботи здати радіоактивний препарат лаборанту.
6. До виконання роботи допускаються лише ті студенти, які добре засвоїли правила техніки безпеки.

### Опис пристрою

Пристрій складається з: (рис. 3)

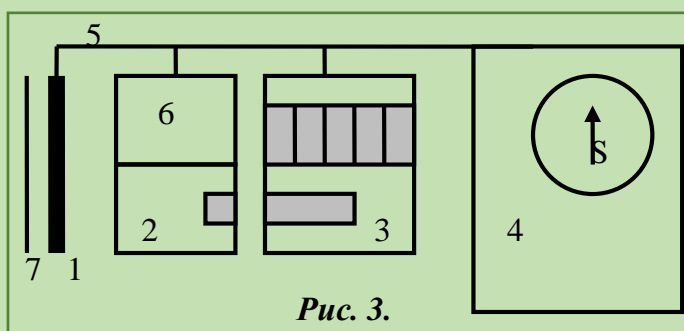
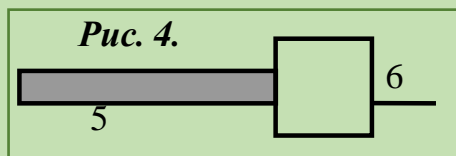


Рис. 3.

1. Лічильника Гейгера-Мюллера VA-Z-118.
2. Адаптера лічильника для підсилення імпульсів і їх звукової реєстрації.
3. Електронного лічильника імпульсів з цифровою індикацією Polidigit-1.
4. Центрального годинника для програмного управління.
5. З'єднувальних провідників.

- 6. Вольтметра з межами вимірювання 300-600 В.
- 7. Набору абсорбційних пластин з тримачем.

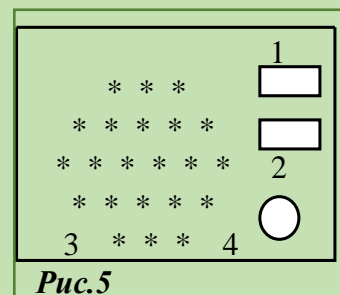
**1. Лічильник Гейгера-Мюллера VA-Z-118 показаний на рис. 4. Тут: 5 – корпус лічильника, 6 – кабель для під'єднання.**



### 2. Адаптер лічильника.

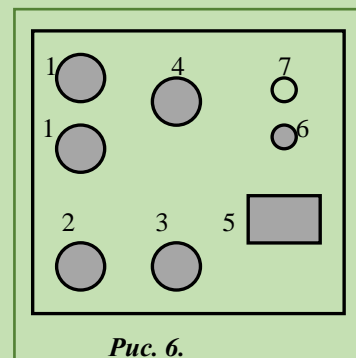
На передній панелі розміщено: (рис. 5.)

1 – клавіша ввімкнення живлення мережі; 2 – клавіша ввімкнення гучномовці; 3 – гучномовець; 4 – гніздо для під'єднання лічильника радіоактивного випромінювання;



На задній стінці розміщено (рис. 6):

1 – два вимірювальних гнізда для контролю і встановлення напруги за допомогою вольтметра; 2 – гніздо під'єднання цифрового лічильника; 3 – не використовується; 4 – регулятор напруги 300-600 В; 5 – штекер для під'єднання до мережі; 6 – автоматичний запобіжник-вимикач; 7 – сигнальна лампочка.

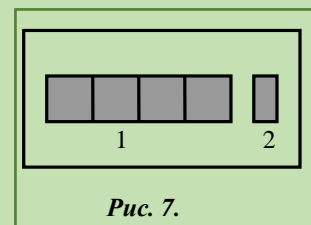


### 3. Цифровий лічильник.

Лічильник універсальний, тобто підраховує будь-які електричні імпульси. Температура приладу не повинна набагато відрізнятись від температури повітря в приміщенні, щоб уникнути утворення конденсованих плівок, які можуть створити струми стікання і пошкодити прилад.

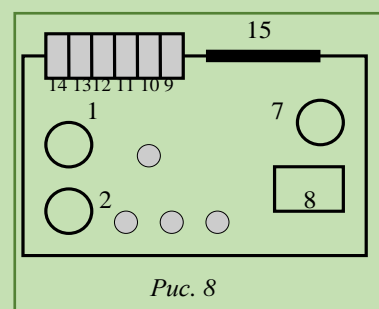
На передній стороні розміщені (рис.7.):

1 – вікно ламп цифрової індикації; 2 – змінні таблиці-транспаранти одиниць виміру.



На верхній стороні є кнопки керування (рис. 8):

9-1 – “Ввімкнено” – вмикання приладу; 10 – «нуль» – скидає на “0” покази цифрової індикації; 11-13 – не використовуються; 14 – “Виміри” – виміри і відлік ручного включення; 15 – ручка для перенесення.



На задній стінці розташовані (рис. 8):

1 – вхідне гніздо для під'єднання адаптера; 2 – вхідне гніздо центрального годинника; 7 – запобіжник 220 В, 2 А; 8 – штепсельна розетка для під'єднання до мережі.

#### 4. Центральний годинник (рис. 9).

Використовується для виміру часу з аналоговою індикацією до 60 с та як акустичний і оптичний давач імпульсів. Приведення стрілки в нульове положення виконується за допомогою валу стрілки *S*; у правому верхньому куті є лампочка індикації. На верхньому боці розміщені:

1 – програмний важіль для попереднього вибору часу; 2-1 – ввімкнення приладу; 3 – Signal – коли за-

вершується вибраний проміжок часу, чути короткий сигнал; 4 – Program – включення цієї кнопки визначає зупинку годинника і всього пристрою, коли закінчується вибраний інтервал часу; 5 – Messen – “Вимір” – включення годинника.

На задній панелі розміщені (рис. 9):

6 – підключення цифрового лічильника для керування ним; 7 – вихід в мережу; 8 – запобіжник 220 В, 0,16 А.

**5. З'єднувальні провідники:** провід з металевим наконечником, яким з'єднуються лічильник Гейгера-Мюллера і адаптер; шнур з чорними тримачами: шнур з білими тримачами; шнур для під'єднання вольтметра до адаптера; три провідники для під'єднання приладів 2,3,4 в мережу.

**6. Вольтметр** з межами вимірювання 300-600 В за допомогою шнура під'єднується до приладу 2.

#### 7. Набір абсорбційних пластин.

За допомогою набору можна досліджувати залежність поглинання і розсіяння радіоактивного випромінювання від матеріалу та його товщини у кількісному і якісному відношенні. Для кріплення пластин потрібен штатив і тримач пластин.

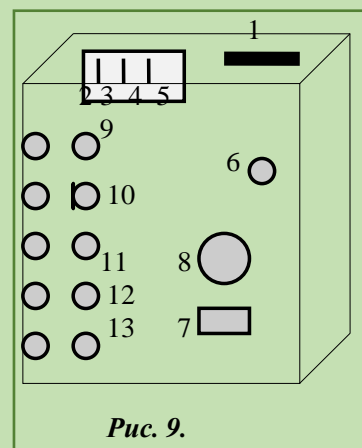


Рис. 9.

## Монтування пристрою

1. За допомогою шнура 1 під'єднати лічильник радіоактивного випромінювання до гнізда 4 адаптера. Лічильник закріплюється в штативі.
2. Під'єднати адаптер до мережі за допомогою шнура 5.
3. Приєднати цифровий лічильник.
4. Приєднати центральний годинник.
5. Виконайте дослідження, зазначені в експериментальній частині.

При потребі ознайомтесь з заводською інструкцією до обладнання.

## Експериментальна частина

1. Перевірити, чи вірно підключені всі прилади установки. Встановити на універсальному вимірювальному приладі типу «АВО-5» перемикач роду робіт на (-) постійний струм, а перемикач меж вимірювань на «600 В». Розміщений на задній стінці адаптера регулятор напруги лічильника переміщують у крайнє ліве положення (найменша напруга).
2. Щоб включити адаптер лічильника, центральний годинник і цифровий лічильник, треба натиснути на клавішу {1} «Вмикання і вимикання» приладу.
3. Перевірити підключення акустичного сигналу на адаптері.
4. Встановити годинникову стрілку на нульове положення, повертаючи її за годинниковою стрілкою ручкою {5}, яка розміщена в середині циферблата.
5. Встановити початкову напругу на лічильнику (її визначає керівник занять).
6. Щоб на цифровому лічильнику скинути дані з цифрової індикації, треба натиснути на червону клавішу.
7. Одночасним натисканням білих клавіш («Messen» – вимірювання), виконати пуск цифрового лічильника і годинника. Вимірювання виконувати в проміжок часу, вказаний керівником заняття.
8. В кінці проміжку часу одночасно натиснути на ті самі білі клавіші і зупинити лічбу імпульсів і відлік часу, записати виміри.
9. Змінювати напругу на лічильнику Гейгера-Мюллера за вказівками керівника занять і повторювати пункти 6, 7, 8 для кожного значення напруги.

10. Найбільше значення напруги на лічильнику – 600 В.
11. Після закінчення вимірів вимкнути прилади, натиснувши клавіші {1}.
12. За отриманими даними визначити фон (кількість імпульсів за 1 хв) для кожного значення напруги і побудувати графік залежності кількості цих імпульсів за хвилину часу від напруги.

### **Контрольні запитання**

1. Поясніть конструкцію і принцип дії лічильника Гейгера-Мюллера.
2. Опишіть робочу характеристику лічильника.
3. Поясніть порядок роботи з приладами комплекту.
4. Поясніть ділянки роботи лічильника Гейгера-Мюллера.
5. Які є види лічильників та який принцип їх роботи?

### **Література**

1. Інструкція з обслуговування комплекта приладів для вивчення радіоактивного випромінювання.
2. Кортнев А.В. Практикум з фізики. С. 484-492.



## ПЕРЕВІРКА СПІВВІДНОШЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ДЛЯ ФОТОНІВ

**Мета роботи:** експериментальне підтвердження виконання співвідношення невизначеностей для фотонів.

**Прилади та приладдя:** гелій-неоновий лазер, градуйована калібрована щілина, екран, лінійка вимірвальна.

### Теоретична частина

Нехай плоска монохроматична світлова хвиля падає на щілину завширшки  $a = \Delta x$  (рис. 1), де  $I$  – інтенсивність світла,  $\omega$  – циклічна частота,  $k$  – хвильове число.

Після щілини світлові хвилі розповсюджуються у різних напрямках. Більша частина енергії хвилі, яка пройшла, приходиться на сектор кутів  $-\varphi_1 < \varphi < \varphi_1$ , де кут  $\varphi$ , що відповідає напрямку на перший мінімум підпорядковується інтерференційній умові:

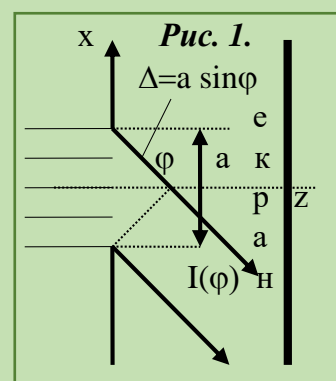
$$\Delta = \Delta x |\sin \varphi_1| = \lambda. \quad (1)$$

Співвідношення (1) визначає умовну межу  $\varphi = \varphi_1$  спектру плоских хвиль на виході із щілини. Враховуючи, що випромінювання розсіюється як на більші  $\varphi > \varphi_1$ , так і на менші  $\varphi < -\varphi_1$  кути, можна записати таку хвильову умову невизначеності:

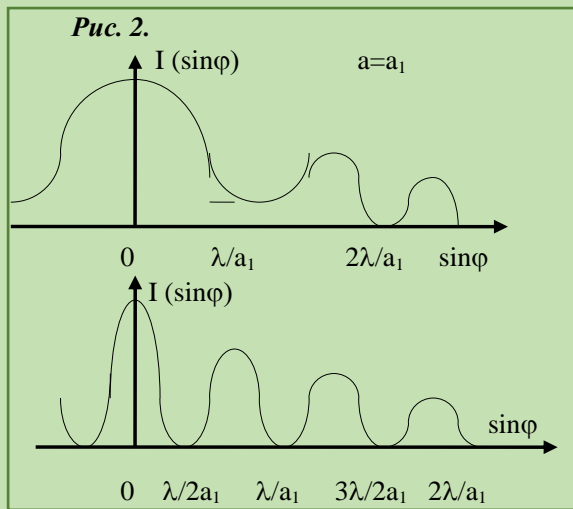
$$\Delta x |\sin \varphi| \geq \lambda, \quad (2)$$

якій підпорядковуються кути для більшої частини плоских хвиль, розсіяних на щілині.

Нерівність (2) відноситься до хвиль будь-якої фізичної природи. Воно вказує, що звуження щілини обов'язково супроводжується розширенням сек-



тору напрямків, в якому зосереджується дифракційне поле. На рис. 2 показано приклад розподілу інтенсивності  $I$  з кутами для двох щілин різної ширини.



З рисунка видно, що при збільшенні ширини щілини у два рази, тобто при  $a_2 = 2a_1$ , інтервал значень  $\sin\varphi$ , що відповідає центральному максимуму, скорочується у два рази.

Співвідношення яке ми розглядаємо, можна записати інакше, якщо подати електромагнітну (світлову) хвилю як потік фотонів з енергією  $E = h\omega$  і імпульсом  $P = hk$ .

Нехай фотони, які падають, мають лише  $z$ -компоненту імпульсу:  $P_z = i_z h / \lambda$ .

Після проходження через щілину у фотоні з'являється  $x$ -компонента імпульсу (рис.3):  $P_x = kh \sin\varphi = h/\lambda \sin\varphi$

Для фотонів, які відхиляються на різні кути, значення  $P_x$  різні. На основі (2) маємо:

$$\Delta x \Delta P_x \geq h \text{ або } \Delta x \Delta P_x / h \geq 1, \quad (3)$$

де  $\Delta x = a$  область локалізації (невизначеність місцезнаходження) фотонів у площині щілини  $z = 0$ , а  $\Delta P_x$  – область значень (невизначеність) компоненти імпульсу.

Співвідношення (3<sup>x</sup>) показує, що добуток невизначеності координати на невизначеність відповідаючого їй імпульсу має величину порядку  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$ .

Чим точніше визначена одна з цих величин, наприклад, чим вужче щілина, через яку проходять фотони, тим більш невизначеним стає імпульс  $\Delta P_x$ , і, навпаки, чим ширша щілина  $a = \Delta x$ , тим більш визначений імпульс,  $\Delta P_x \rightarrow 0$ . Очевидно, якщо одна з величин  $\Delta x$  і  $\Delta P$  має цілком визначене значення, то друга є зовсім невизначеною.

В даній роботі співвідношення невизначеностей (3) перевіряється експериментально для фотонів. На досліді вимірюється ширина щілини, яка харак-

теризує невизначеність, координати фотона  $\Delta x$  в області щілини і ширина дифракційної картини, яка обумовлює невизначеність поперечного імпульсу фотону в області екрану ( $\Delta P_x$ ).

### Опис експериментального пристрою

Пристрій для перевірки принципу невизначеності складається з джерела монохроматичного випромінювання (гелій-неонового лазера), щілини змінної ширини і екрану, на якому можемо спостерігати дифракційну картину (див. рис. 3).

1. Калібрована щілина має лінійну шкалу з ціною поділки 1 мм і кругову шкалу з ціною поділки 0,01 мм.
2. Опис будови і принцип дії гелій-неонового лазера і випромінюваного ним монохроматичного світла (з літератури).

### Експериментальна частина

Випромінюваний гелій-неоновим лазером пучок світла проходить через калібровану щілину і попадає на екран, в якості якого використовуємо лист міліметрового паперу.

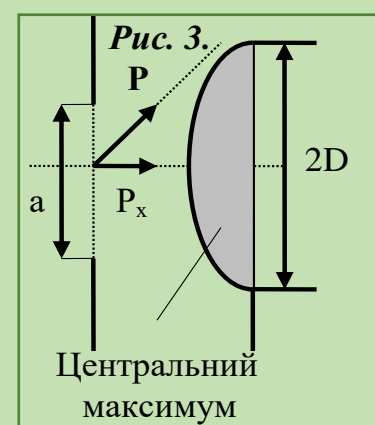
**Завдання 1.** Градування каліброваної щілини.

Через недосконалість конструкції щілини число поділок, відрахованих на її барабані, не зв'язано лінійно з шириною відповідного отвору.

Градування щілини проводить з допомогою мікроскопу. Визначте розмір отвору щілини  $a$  і зафіксуйте відповідне число поділок барабану. Отримані значення  $n$  і  $\Delta x$  занесіть до таблиці і потім побудуйте градуйовану криву.  $\Delta x = f(n)$ .

**Завдання 2.** Перевірка співвідношення невизначеностей.

Використовуючи смужки, на яких встановлюється калібрована щілина, треба домогтися того, щоб промінь лазера пройшов через її отвір і попав на екран. Змінюючи розмір щілини від 0,05 до 0,40мм че-



рез кожні 0,03-0,05 мм, зробіть 10-12 вимірів, які полягають у визначенні ширини  $2D$  головного максимуму дифракційної картини, одержаної на екрані (див. рис. 3). Виміряйте ширину головного максимуму за допомогою лінійки, потім шляхом рахування числа поділок міліметрового паперу, який використовується в якості екрана. Для збільшення точності вимірів встановіть калібровану щілину на відстань не менше 1,5 м від екрану. Ширину максимуму треба визначити за положенням темних смуг, які облямовують максимум.

Результати вимірів  $\Delta x$ ,  $2D$  і  $D$  (половина ширини головного максимуму) занести в таблицю. Побудуйте графік залежності напівширини головного максимуму  $D$  від розміру щілини  $\Delta x$ .

Величину  $\Delta P_x / h = \sin \varphi / \lambda$  визначаємо шляхом обчислення  $\sin \varphi_1 = D / L$  і відомої довжини хвилі монохроматичного світла, яке випромінює лазер  $\lambda = 6,33 \cdot 10^{-7}$  м, де  $L$  – віддаль від щілини до екрану.

Підставляючи одержані значення  $\Delta x$  і  $\Delta P_x / h$  в формулу (3), переконуємося, що добуток наближається до 1, тобто чим більша невизначеність координати фотона, тим менша невизначеність його імпульсу і навпаки.

Обробка результатів вимірів:

- а) обчислення  $\Delta P_x / h = D / (L \lambda)$  і  $\Delta x \Delta P_x / h$ .
- б) побудова графіка залежності  $D$  від  $\Delta x$ .

### Контрольні запитання

1. В чому полягає фізичний зміст співвідношення невизначеностей? Яке максимальне просторове розділення може забезпечити потік нейтронів з енергією  $E = 1$  eV?
2. Чому електронний мікроскоп може забезпечити більш високе розділення ніж оптичний мікроскоп? Що таке нульові коливання? Як пояснити наявність нульових коливань з допомогою принципу невизначеностей?
3. Які переваги забезпечують аналіз величини  $F = \Delta x D / \lambda L$  в порівнянні з аналізом залежності  $D = f(\Delta x)$ ?
4. Використовуючи співвідношення невизначеностей, оцініть:
  - а) енергію електрона в атомі водню в основному стані;

- б) енергію електронів в атомі гелію в основному стані;
  - в) енергію основного стану кантового осцилятора.
5. Чому перевірка співвідношення невизначеностей за допомогою лазерного випромінювання більш надійна, ніж при роботі з іншими джерелами світла (наприклад газосвітною лампою) ?

### **Література**

1. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Еткін В.С. Курс загальної фізики: Оптика і атомна фізика. Млсква, 1981. Гл. 12.
2. Савельєв І.В. Курс загальної фізики. Т. 3.
3. Шпольський Е.В. Атомна фізика. Москва, 1963. Т. 1. Гл. 10.
4. Інструкція до гелій-неонового лазера.

## *Робота № 7*

### ***ВИВЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАХИСТУ ЦІННИХ ПАПЕРІВ***

**Мета роботи:** експериментально встановити наявність елементів захисту цінних паперів.

**Завдання роботи:** для запропонованого оригіналу цінних паперів встановити, описати та замалювати на копіях наявні захисні елементи.

**Обладнання:** копії та оригінали цінних паперів, лупа, ультрафіолетовий освітлювач у затемненому корпусі, джерело живлення, кольорові олівці або кольорові маркери.

### **Теоретична частина**

Явища і процеси фізики мають широке застосування в усіх видах діяльності людей. Одним із напрямків є використання окремих фізичних явищ для захисту цінних паперів.

#### **1. Основні елементи захисту банкнот і цінних паперів**

Надійність загального економічного еквівалента, яким є гроші, хвилює людство з часу їх появи. З початком обігу паперових грошей і поширення цінних паперів проблема фальшивомонетництва надовго, якщо не назавжди, увійшла в наше життя.

Найкращим власним захистом є якість грошових знаків. Тому, щоб виключити можливість фальшивомонетництва, більшість держав ідуть шляхом вдосконалення захисту паперових грошей.

Як відрізнити справжній платіжний квиток від фальсифікації? Для відповіді на це питання розглянемо, які існують способи захисту банкнот і якими засобами розпізнавання автентичності може бути вирішена ця задача. Досить умовно способи захисту банкнот і цінних паперів можна розбити на дві групи.

Органолептичні – виявляються органами чуттів людини (візуальні та поліграфічні захисні ознаки).

Машинозчитувані – суто індивідуальні фізичні образи для кожного виду, номіналу, року випуску банкнот, які можуть бути визначені виключно за допомогою спеціальних приладів.

## **2. Органолептичні захисні ознаки банкнот.**

Захисним ознакам, що належать до органолептичної групи, стільки років, скільки друкуються банкноти, а вдосконалення цих видів захисту продовжується і до цього дня. У цій групі ознак провідне місце займають візуальні, серед яких:

**2.1. Банкнотний папір.** Спеціальні пігменти надають йому оригінальний колір, а добавки різних натуральних волокон (льону, бавовни, шовку) специфічну зносостійкість, жорсткість і дзвінкість. У відбитих ультрафіолетових променях банкнотний папір не люмінесцує, що відрізняє його від звичайного паперу.



### **2.2. Водяний знак.**

Видиме при розгляді на провіт зображення, яке створене внутрішньою структурою паперу. Існують декілька видів водяних знаків: світлі, темні, двохтонові, багатотонові; за розташуванням на банкноті: локальні, загальні та біжучі.



### **2.3. Кольорові волокна і конфетті.**

На стадії відливу паперу в нього додають найтонші кольорові шовкові волокна, здатні люмінесцювати у відбитих ультрафіолетових та інфрачервоних променях, а так само більш великі частки або конфетті, що візуально легко контрольовані.



### **2.4. Захисна нитка (стрічка).**

Введення синтетичних або металізованих ниток (суцільних або пірнаючих) в паперове полотно ще на стадії його відливу істотно ускладнює підробку банкнот.



## 2.5. Кіпр-ефекти і голографічні зображення.

Просторовий характер глибокого друку прихованих зображень, який розпізнається при вивченні банкноти під відповідним кутом падіння або відбиття світла.



## 2.6. Суміщені зображення.

Друк лицьового і зворотного боку банкноти із забезпеченням точного їх поєднання або доповнення.



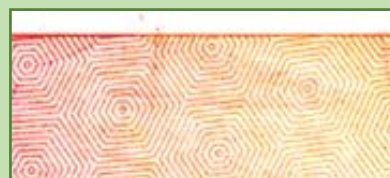
## 2.7. Ефект «овіай».

Ефект зміни кольору окремих елементів або цілих зображень залежно від кута зору.



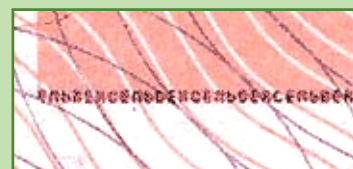
## 2.8. «Орловський» друк.

Відноситься до поліграфічних захисних елементів і виражений в чіткому і різкій зміні одного кольору в інший без розриву та зміщення ліній малюнка.



## 2.9. «Ірисний» гуркіт.

Поліграфічний елемент у вигляді плавного переходу одного кольору ліній захисної сітки в інший.



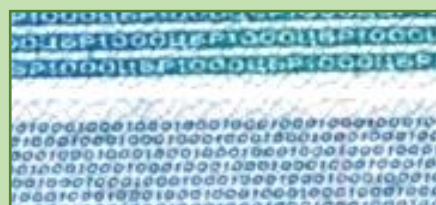
## 2.10. Антисканерна сітка.

Сітка тонких ліній, при копіюванні або скануванні банкноти створює на копії «муаровий» ефект.



## 2.11. «Тактильний» друк.

Поліграфічний елемент з тактильним відчуття малюнка – високий і глибокий друк дозволяє створювати друковані елементи, що сприймаються на дотик.



## 2.12. Мікродрук.

Друк окремих елементів (частіше слів або цілих фраз) висотою до 0,5 мм, що дозволяє розглянути їх при збільшенні не менше ніж у 7 разів.



### 2.13. Мікроперфорація.

Лазерна висічка зображень у вигляді мікроскопічних наскрізних отворів. Візуальні захисні ознаки призначені для контролю справжності банкнот переважно в повсякденному масовому обігу, коли кількість грошових квитків обмежена, є достатньо часу для перевірки та відсутні прилади контролю. Слід зазначити, що фальшивки «середнього рівня», як правило, досить добре роблять у першу чергу саме візуальні захисні ознаки банкнот, тому органолептичний контроль вимагає спеціальних знань і спостережливості.



### 3. Машинозчитувані захисні ознаки банкнот.

Усе більшого розвитку в останні роки отримують машинозчитувані захисні ознаки, що представляють собою запрограмовані комбінації фарб з різними фізичними властивостями, розподілені по банкноті в строго визначеному порядку і створюють легко пізнавані образи в будь-якій області спектру. Такі методи захисту застосовуються зараз в більшості провідних валют світу. Машинозчитувані захисні ознаки утворюються шляхом введення в фарби спеціальних добавок і вносяться в банкноти з використанням унікального поліграфічного обладнання, існуючого в одиничних екземплярах і знаходиться у всіх країнах під державним контролем.

До таких ознак належать.

#### 3.1. Ультрафіолетовий захист.

Захист банкнот люмінофорами – фарбами, флуоресціюючими при ультрафіолетовому освітленні (малюнки і пофарбовані волокна). Розпізнавання таких люмінесцентних фарб більшою мірою розраховане на



візуальне сприйняття, оскільки спектр випромінювання з невидимої ультрафіолетової області фактично переноситься в видиму область відповідного кольору.

### 3.2. Магнітний захист.

Захист банкнот фарбами, що містять магнітні пігменти, які наносяться в окремих областях банкноти із строго певним порядком чергування.



### 3.3. Інфрачервоний захист.

Захист банкнот нанесенням метамерних фарб, що мають різну відбивну здатність в інфрачервоному випромінюванні (області банкнот розрізняються за кольором при використанні ІЧ-випромінювання і виглядають однаково при звичайному освітленні). З усіх відомих засобів захисту грошових знаків, поки фальшивомонетникам жодного разу не вдалося відтворити ІЧ-захист банкнот.



Виявити наявність подібних фізичних властивостей і їх розподіл по банкноті можна тільки за допомогою спеціальних приладів. Відповідні фізичні образи банкнот носять суто індивідуальний характер як для кожного виду валюти та номіналу, так і для року випуску. Фарби з іншими фізичними властивостями можуть бути виявлені тільки за допомогою спеціально розроблених датчиків і приладів, так само як і особливі ознаки паперу та фарб, які є приналежністю виключно справжніх банкнот. Таким чином, фізичні образи машиночитаних захисних ознак надають потужний інструмент для додаткового кодування банкнот, причому інструмент унікальний і практично не відтворений за допомогою будь-якого з видів доступного для фальшивомонетників копіювально-розмножувального та поліграфічного обладнання.

## 4. Банкнота 100 доларів США – елементи захисту.

### 4.1. Елементи оперативного контролю



мікродрук навколо портрета

вкраплення кольорових волокон

Розмір банкноти 156x67мм. Папір тонований, має світло-жовтий відтінок, містить хаотично впроваджені захисні волокна червоного та синього кольорів. Захисні ознаки справжньої банкноти 100 доларів:

1. Мікродрук на лицьовій стороні банкноти: текст «USA100» надрукований в кілька рядів всередині цифри номіналу у лівому нижньому кутку; текст «THE UNITED STATES OF AMERICA» надрукований на лацкані сюртука Франкліна.

2. У папір впроваджена видима на просвіт захисна нитка з повторюваним мікротекстом «USA 100», що читається з лицьової та зворотної сторін банкноти. Захисна нитка розташована вертикально, ліворуч від портрета.

3. Водяний знак розташований на незапечатаному полі в правій частині банкноти і повторює портрет Бенджаміна Франкліна.

4. У правому нижньому куті лицьового боку розташований номінал банкноти «100», виконаний фарбою, яка змінює колір із зеленого на чорний при повороті банкноти.

5. В ультрафіолетових променях захисна нитка має червоне свічення.

6. Тонкі концентричні лінії утворюють фон для портрета на лицьовій стороні і для Палацу Незалежності на зворотній стороні банкноти. На копії, при відтворенні банкноти на репрографічному обладнанні, на вказаних місцях з'являється слабкий муар (темні і світлі ділянки). Лицьова сторона банкноти виконана металографічним способом друку. Написи «THE UNITED STATES OF AMERICA, ONE HUNDRED DOLLARS» мають збільшену товщину барвистого шару і добре сприймаються на дотик. Багато, перевіряючи банкноту, просто проводять по цьому напису пальцем. При цьому добре відчувається опуклість букв. Серійний номер, печатки Федеральної резервної системи і Державного Казначейства виконані методом високого друку. Зворотна сторона банкноти виконана металографічним способом друку. Крім того, на справжніх купюрах портрет виконаний чітко і контрастно, як би з підкладкою. На підроблених купюрах він неживий і нерельєфний. Деталі зливаються з заднім планом, який зазвичай темніше оригіналу або має характерні вкраплення.

## 4.2. Печатки.

Віддруковані зеленим кольором, круглі. На справжніх доларах, зображення на печатках чітко видно, зубці рівні й гострі. Зірочки всередині неї під збільшувальним склом виглядають чітко. На підроблених вони можуть бути розмиті, з нерівностями або мати розриви. З випуском нових купюр номіналом в 100 доларів навколо портрета з'явилася повторювана напис «The United States of America». У старих купюрах завжди вказувався федеральний резервний округ в якому була випущена (емітована) банкнота, тепер це єдина печатка Федеральної резервної системи США.

зубчики від друку з гострими краями



чіткі краї зірочок

## 4.3. Серійний номер.

Серійний номер, складається з 8 цифр та 3 букв на лицьовій стороні банкноти у верхньому лівому і правому



нижніх кутах, на справжніх купюрах чітко видний і віддрукований. Цифри номера розташовуються через рівні проміжки і на одній лінії. Цифри виконуються тим же кольором, що і печатка казначейства. На підроблених купюрах, серійний номер може помітно відрізнятися від кольору друку або мати інший відтінок. Цифри номера можуть розташовуватися нерівномірно, вище або нижче, мати різний інтервал.

## 4.4. Межі.

На справжній банкноті зовнішні лінії виразні. На фальшивій лінії і орнамент, виконаний у вигляді завитків, при підробці буває неясним або віддрукованим не повністю. Майте на увазі, що не залежно від номіналу купюри, їх розміри абсолютно однакові, тобто при накладенні купюри на купюру різного гатунку, їх розміри повинні повністю співпасти. Однак, на практиці помічено, що розміри купюр одного і того ж формату іноді можуть відрізнятися приблизно на 1 мм.



## 4.5. Папір.

Для захисту купюр також використовуються мікрволокна червоного і блакитного кольорів. При підробці – фальшивомонетники як правило не мо-

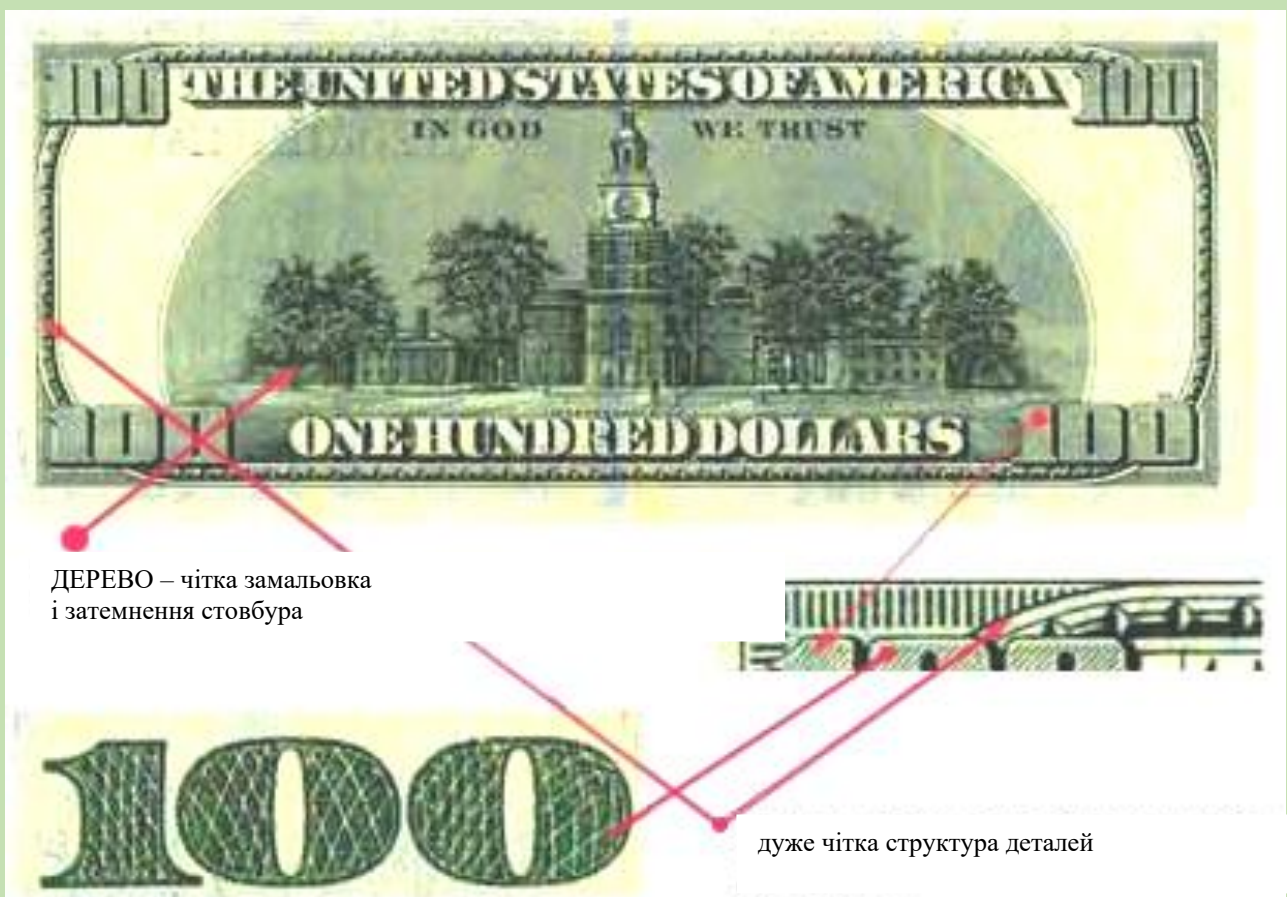
жуть внести в структуру паперу ці волокна, а тільки нанести на поверхню купюри. Волокна з цієї купюри можна видалити, а на підробленій вони будуть стиратися. Крім цього захисна нитка при освітленні ультрафіолетом світитися червоним кольором.

#### 4.6. Барвник.

Поширена думка, що з справжніх доларів не повинна зовсім стиратися фарба, немає – залишення легкого сліду – ознака справжності купюри. Для більш надійного захисту купюр Казначейством США був зроблений додатковий захист – на 100 доларовій купюрі з'явилася металева смужка з мікродрукком.

#### 4.7. Зміна забарвлення.

Найважливіше, що при розгляді купюри зверху вниз під різним кутом, вона буде здаватися (відображатися) в різному кольорі, від переходу з зеленого до чорного.

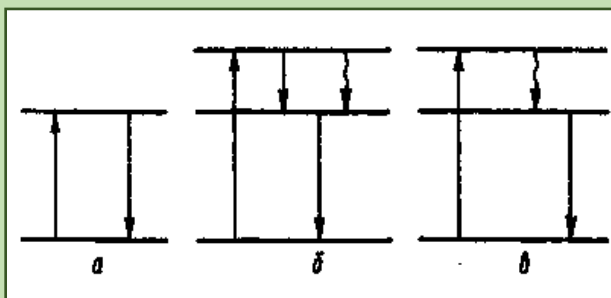


#### 5. Люмінесценція.

Одним з елементів захисту є люмінесцентний прояв прихованих зображень або зміна кольору видимих елементів при освітленні цінних паперів ультрафіолетовим світлом. Люмінесценція – це випромінювання, надлишкове

над тепловим випромінюванням тіла при даній температурі, яке має тривалість більшу за період світлових хвиль. Перша частина цього визначення запропонована Е. Відеманом для розмежування люмінесценції і рівноважного теплового випромінювання. Якщо теплове випромінювання у видимій області спектра стає помітним тільки при температурі тіла декілька сотень або тисяч градусів, то люмінесціювати воно може при будь-якій температурі. Тому люмінесценцію іноді називають холодним світінням. Друга частина цього визначення про тривалість світіння введена С. І. Вавиловим для того, щоб відрізнити люмінесценцію від інших видів світіння. Люмінесцентне випромінювання може відбуватись у видимій, близькій ультрафіолетовій та інфрачервоній ділянках спектра.

При люмінесценції, як і при інших видах випромінювання, тілом витрачається енергія. Тому для підтримання люмінесценції необхідно поповнювати енергію тіла. Люмінесценцію класифікують залежно від типу збудження. Так, катодолюмінесценція, рентгенолюмінесценція та іонолюмінесценція виникають у разі опромінювання речовини електронними, рентгенівськими та іонними пучками відповідно. Світіння, що виникає під час хімічних реакцій, називають *хемілюмінесценцією*. Світіння, яке виникає при розтиранні, роздавлюванні або розколюванні деяких кристалів, називають *триболюмінесценцією*. Одним із важливих видів люмінесценції є *фотолюмінесценція*, яка виникає при опромінюванні речовини світлом. За тривалістю люмінесценції її поділяють на *флуоресценцію* ( $\tau < 10^{-8} \text{ c}$ ) і *фосфоресценцію* ( $\tau > 10^{-8} \text{ c}$ ). За механізмом висвічування люмінесценцію поділяють на резонансну, спонтанну, вимушену та рекомбінаційну.



Резонансну люмінесценцію спостерігають в атомних парах, в яких при збудженні атом переходить на вищий енергетичний рівень і, повертаючись у початковий стан, випромінює (рис. *a*). Спонтанна люмінесценція включає перехід збудженого атома до проміжного збудженого стану. Цей перехід може бути безвипромінювальним або випромінювальним. Перехід із проміжно-

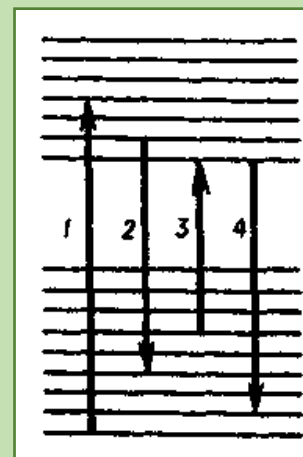
го збудженого стану на нижчий енергетичний рівень супроводжується випромінюванням (рис. б). Цей вид люмінесценції характерний для складних молекул, які знаходяться в парах і розчинах. Вимушена, або метастабільна, люмінесценція характеризується переходом збудженого атома на метастабільний рівень з наступним переходом на рівень випромінювання (рис. в). Перехід з метастабільного рівня на рівень випромінювання проходить з виділенням енергії. Прикладом вимушеної люмінесценції є фосфоресценція органічних речовин. Рекомбінаційна люмінесценція відбувається при молізації іонів, рекомбінації електронів і дірок. Вона характерна для кристалофосфорів і напівпровідників.

У наш час вивчені всі види люмінесценції. Особлива увага була приділена вивченню фотолюмінесценції. Випромінювання, яке спричиняє люмінесценцію, називають оптичним збудженням і характеризують спектром поглинання. Люмінесцентне випромінювання, що при цьому виникає, характеризують спектром люмінесценції.

У 1852 р. Дж. Стокс (1819-1903) виявив, що спектр люмінесценції припадає на більші довжини хвиль, ніж спектр поглинання. Таке випромінювання називають стоксовим. Подальші дослідження люмінесценції показали, що спостерігається також випромінювання з довжинами хвиль, які менші за ті, що збуджують люмінесценцію. Таке випромінювання називають антистоксовим. Та Е. Ломмель показав, що це не завжди має місце, і встановив закономірність, яка виконується завжди і називається законом Стокса–Ломмеля. Він формулюється так: спектр люмінесценції і його максимум зміщені в бік довших хвиль порівняно із спектром поглинання і його максимумом.

У багатоатомних молекулах стоксове і антистоксове випромінювання зумовлене переходами між електронно-коливальними рівнями. Переходи 1 і 2 викликають стоксове, а 3 і 4 – антистоксове люмінесцентне випромінювання.

При низьких температурах інтенсивність стоксового випромінювання значно переважає інтенсивність антистоксового випромінювання. З підвищенням температури



інтенсивність стоксового випромінювання зменшується, а антистоксового збільшується, проте залишається меншою за стоксове випромінювання.

Існують люмінесцентні речовини, для яких спектр люмінесценції 2 перекривається спектром поглинання 1. Область перекриття (на рис. заштриховано) називають антистоксовою.



Для кількісної характеристики люмінесценції С.І. Вавилов ввів поняття енергетичного і квантового виходів. Під енергетичним виходом люмінесценції  $\eta_e$  розуміють відношення енергії люмінесценції  $\varepsilon_l$  до енергії поглинутого світла, тобто

$$\eta_e = \varepsilon_l / \varepsilon_n.$$

Квантовий вихід люмінесценції  $\eta_{кв}$  визначається відношенням числа квантів люмінесценції  $N_l$  до числа поглинутих квантів  $N_n$ , тобто

$$\eta_{кв} = N_l / N_n.$$

Квантовий вихід залежно від довжини хвилі випромінювання, яке збуджує люмінесценцію, та від структури молекул речовини може набирати значення менше, рівне і більше одиниці. Між енергетичним і квантовим виходами легко встановити зв'язок, оскільки  $\varepsilon_e = N_l hc / \bar{\lambda}_l$  ( $\bar{\lambda}_l$  – середнє значення довжини хвилі люмінесценції), а  $\varepsilon_n = N_n hc / \bar{\lambda}_n$ . Тоді

$$\eta_e = \eta_{кв} \frac{\lambda_n}{\lambda_l}.$$

Дослідним шляхом С.І. Вавилов встановив, що енергетичний вихід люмінесценції в області сталого квантового виходу до певної міри зростає пропорційно довжині хвилі збуджувального світла, а потім різко спадає до нуля. Спад величини  $\eta_e$  відбувається за таких довжин хвиль збуджувального світла, енергія фотона яких недостатня для переведення центра люмінесценції у збуджений стан.



Якщо люмінесціюючу речовину опромінювати потоком збуджуваного світла постійної інтенсивності, то потужність люмінесценції також буде сталою. Раптове припинення збудження приводить до затухання люмінесценції. Час затухання люмінесценції залежно від природи речовини та інших фізичних умов складає від 10 с до кількох діб для деяких кристалофосфорів. Кристалофосфорами, або люмінофорами, називають кристалічні речовини, здатні люмінесціювати під дією збудження. Часто вони являють собою синтетичні кристалічні речовини, в які спеціально введені домішки – активатори. Після припинення збудження світіння кристалофосфорів затухає в часі за гіперболічним законом на відміну від затухання світіння дискретних центрів, яке відбувається за експоненціальним законом.

Важливою особливістю люмінесценції є можливість спостереження світіння за наявності досить малої кількості речовин люмінофора ( $10^{-13}$  кг). Така висока чутливість дає змогу широко застосовувати люмінесцентний аналіз. Явище люмінесценції застосовується в люмінесцентних джерелах світла, в сцинтиляційних лічильниках тощо.

### **Експериментальна частина**

1. Отримавши оригінал та копії цінних паперів, на оригіналі встановити наявність елементів захисту і вказати їх на копіях та у звіті роботи.
2. Покласти оригінал цінних паперів однією стороною під ультрафіолетовий освітлювач і встановити розташування та колір люмінесцентного ультрафіолетового захисту. На копії цінних паперів відмітити ці місця кольором, близьким до оригінального.
3. Виконати таку ж процедуру для іншої сторони цінних паперів.
4. Оформити звіт роботи.

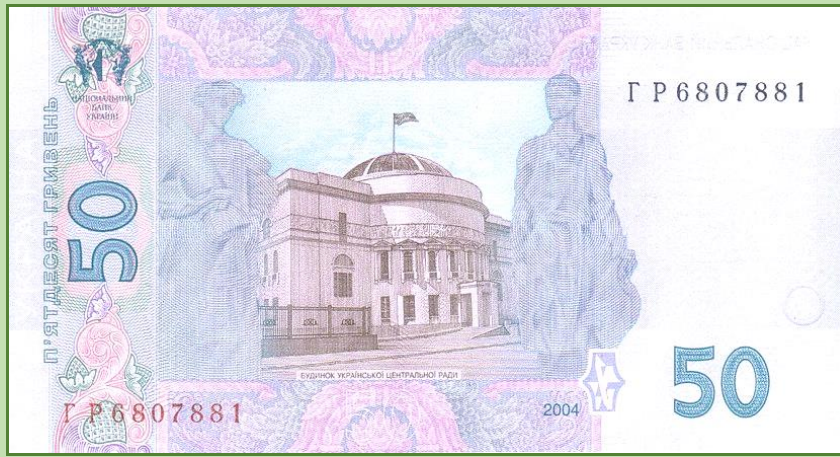
### **Контрольні запитання**

1. Назвіть основні елементи захисту цінних паперів. Які з елементів захисту можна виявити без допоміжного обладнання?
2. У чому полягає суть явище люмінесценції? Який тип люмінесценції використано в цій роботі?

3. Чому при використанні одного джерела освітлення різні ділянки цінних паперів мають різний колір?
4. Які оптичні явища використано в елементах захисту запропонованого оригіналу цінних паперів?
5. Чому для виявлення елементів ультрафіолетового захисту потрібно захищати оригінал цінних паперів від попадання стороннього світла?









## ВИВЧЕННЯ ОСНОВ РАДІАЦІЙНОЇ ДОЗИМЕТРІЇ ТА ПРАКТИЧНА РОБОТА З ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЦІЙНОГО ФОНУ ДОЗИМЕТРОМ

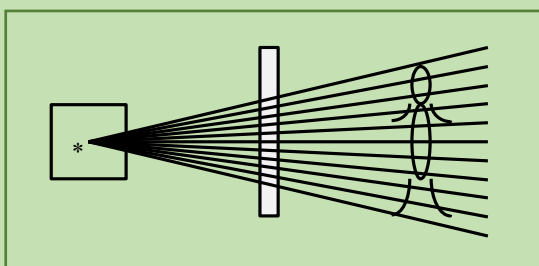
**Мета роботи:** знайомство з основними величинами та одиницями їх виміру. Набути досвіду роботи з деякими типами дозиметрів.

**Прилади і матеріали:** дозиметри типа ДП-5Б і ДП- 22-В, СРП-68, радіоактивний препарат, вимірювальна лінійка.

### Теоретична частина

#### Основи радіаційної дозиметрії

У зв'язку з бурхливим розвитком ядерної енергетики та широким використанням радіоактивних ізотопів у різних галузях господарської та наукової діяльності людини виникла потреба введення кількісних характеристик радіаційного фону (поля) та його джерел, а також кількісних характеристик результатів впливу радіаційного поля на речовину взагалі та живі організми зокрема.



Прикладний розділ ядерної фізики, який займається вивченням кількісних характеристик радіаційних полів та їх джерел, а також результатів дії радіаційного поля на живі організми, а також людину, взаємодії радіаційного поля з речовиною, дістав назву *радіаційної дозиметрії*.

Останнім часом за відомих причин інтерес до питань радіаційної дозиметрії значно зріс не лише у фахівців, а також і у широких верств населення. В зв'язку з цим назріла необхідність введення елементів радіаційної дозиметрії в програму з фізики для середньої школи, а також і педагогічних вузів.

В радіаційній дозиметрії серед множини величин, що характеризують радіаційне випромінювання та його взаємодію з речовиною можна виділити чотири характерних дозиметричних величини та одиниці їх вимірювання.

1. Дозиметричні величини, що характеризують джерело радіаційного поля.
2. Величини, що описують кількісні характеристики радіаційного поля.
3. Дозиметричні величини, що характеризують кількісну міру дії радіаційного поля на речовину неживої природи.
4. Величини, які характеризують кількісну міру результатів дії радіаційного поля на живі організми, а також людину.

Найменування, позначення і одиниці вимірювання цих величин можна ілюструвати таблицею:

опромінення				
джерело випромінювання	поле випромінювання	неживі об'єкти	живі організми	системи одиниць
Активність (А)	Експозиційна доза (Д)	Поглинута доза (Дп)	Еквівалентна доза (Де)	
Кюрі (Кю)	Рентген (Р)	Рад	Бер	Несистемна
Бекерель (Бк)	Кл/Кг	Грей (Гр)	Зіверт (Зв)	система СІ

### Коротка характеристика основних дозиметричних величин.

1. Кількісною характеристикою радіоактивного препарату є його активність (А). Активність визначається числом атомних ядер, які розпадаються у цьому препараті за одиниці часу.

За одиницю активності у системі СІ приймають активність препарату, у якому відбувається один розпад за одну секунду. Ця одиниця одержала назву *бекерель* (Бк), і  $1 \text{ Бк} = 1 \text{ розпад/с}$ , на честь французького фізика Бекереля, який відкрив у 1896 році природню радіоактивність. Але через те, що ця одиниця надто мала, вона використовується дуже рідко. Практичне значення має позасистемна одиниця – *кюрі* (К):  $1 \text{ К} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ .

Історично одиниця активності кюрі визначилася як активність одного грама радію, який знаходиться у рівновазі з продуктами свого розпаду. Якщо,

використовуючи закон радіоактивного розпаду, підрахувати число ядер в 1  $\mu$  радію, який розпадається за 1с, то воно буде рівним  $3,7 \cdot 10^{10}$ . Іноді можна зустріти ще одну позасистемну одиницю активності, яка отримала назву *резерфорд* (Рз):  $1 \text{ Рз} = 10^6 \text{ Бк}$ .

2. Кількісною характеристикою поля радіаційного випромінювання є *експозиційна доза* (Д). В основу цієї величини покладено іонізуючий вплив поля радіаційного випромінювання на сухе повітря при нормальних умовах.

Спочатку практична радіаційна дозиметрія обслуговувала медицину, де частіше всього доводилось мати справу з рентгенівським випромінюванням, яке іонізувало повітря навколо рентгенівської трубки. Вимірювання цієї іонізації і було покладено в основу кількісної міри радіаційного поля. Оскільки спочатку використовувались малопотужні джерела рентгенівського випромінювання (з енергією не більше 3 МеВ), яке мало здатність впливати лише на зовнішні покривні м'які тканини людини, ефективний атомний номер яких  $Z_{ef} = 7,64$  практично співпадає з ефективним атомним номером повітря за нормальних умов  $Z_{ef} = 7,42$ , то за ефектом дії радіаційного поля на повітря можна було судити і по його дії на м'які тканини людини.

3. Одиницею експозиційної дози в системі СІ є *кулон на кілограм* (Кл/Кг). Це експозиційна доза такого поля випромінювання, при якому в 1 кг маси сухого повітря за нормальних умов створюються іони, які несуть заряд в 1 Кл (кожного знаку). Проте треба знати, що і в наш час на практиці використовується початково введена позасистемна одиниця експозиційної дози – *рентген* (Р). Рентгеном визнається одиниця такого поля випромінювання, яке утворює в 1  $\text{см}^3$  (тобто в 0,001293 г) сухого повітря за нормальних умов число іонів, які несуть заряд одного знаку в одиницю СГСЕ ( $1/3 \cdot 10^9 \text{ Кл}$ ). Тобто, рентген можна подати, як заряд, утворений в масі одиниці об'єму повітря. Тому рентген визначається таким чином:  $1 \text{ Р} = 2,08 \cdot 10^9 \text{ пар іонів/см}^3$  або  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/Кг}$ .

Експозиційна доза, віднесена до одиниці часу, називається *потужністю дози*. Потужність дози поля випромінювання від радіоактивного препарату прямо пропорційна його активності і обернено пропорційна квадрату відстані від нього і залежить від виду випромінювання. Для прикладу можна вказати,



що джерело радіо активністю  $1 K$  на відстані  $1 m$  від нього утворює потужність дози  $1 P/год$ .

Пізніше почали використовувати нові потужні джерела випромінювання. Крім рентгенівських і  $\gamma$ -променів знайшли застосування потоки прискорених електронів, протонів, позитронів, важких заряджених частинок, а також нейтронів. Виявилось необхідним знати поглинуту енергію випромінювання в різних середовищах. В зв'язку з цим в радіаційну дозиметрію була введена нова величина, яка характеризує дію будь-якої радіації на різні середовища. Так з'явилося поняття *поглинутої дози* (Дп). Поглинута доза визначається енергією, яку поглинає одиниця маси опроміненої речовини.

Одиницею Дп в системі СІ служить *грей*. Ця одиниця названа на честь англійського фізика Грея. Один грей – це доза, при поглинанні якої  $1 kg$  речовина одержує  $1 Дж$  енергії:  $1 Gr = 1 Дж/кг$ . Позасистемна одиниця, яка до цих пір використовується в практиці дозиметрії, є *рад* (від англійського: поглинута доза випромінювання).  $1 РАД = 0,01 гр$ .

Так як для м'яких тканин людини поглинання рентгенівських променів таке ж, як і для повітря, то можна оцінювати поглинання м'яких тканин організму не по Дп, а по експозиційній дозі  $D$ . Поглинута доза в  $1 РАД$  приблизно відповідає  $1 P$ ,  $1 P = 0,88 рад$ .

4. Здавалося би, для характеристики радіобіологічного ефекту достатньо поняття поглинутої дози (Дп). Однак, вивчення живих тканин організму показало, що при однакових Дп радіобіологічний ефект тим вищий, чим щільніша іонізація. Щоб урахувати цей ефект, вводиться поняття **ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ДОЗИ** (Де). Вона визначається співвідношенням:  $De = K Дп$ , де  $K$  – коефіцієнт, який не має розмірності.  $K$  ще називають *відносною біологічною ефективністю* (ВБЕ) або *коефіцієнтом якості* (КЯ). Для рентгенівського,  $\gamma$ - і  $\beta$ -випромінювання  $K = 1$ . Для теплових нейтронів  $K = 5$ , для швидких нейтронів і протонів  $K = 10$ , для  $\alpha$ -часток  $K = 20$ .

Одиницею випромінювання еквівалентної дози в системі СІ є *зіверт* (Зв) – на честь шведського радіолога Зіверта. Позасистемною одиницею еквівалентної дози служить **БЕР** (*бер*) – біологічний еквівалент рада,  $1 бер = Rad \cdot ВБЕ$ .

Якщо випромінювання являє собою суміш  $\gamma$ - і  $\beta$ -випромінювань ( $K = 1$ ), то можна замість  $D_e$  використовувати  $D_n$ , а іонізацію м'яких тканин рахувати не по  $D_n$ , а по  $D$ . Це дозволяє за показами приладів у рентгенах без перерахунку оцінити еквівалентну дозу в берах. Наприклад, хай індивідуальний дозиметр експериментатора зафіксував радіаційне поле  $\gamma$ -випромінювання в 10 мр. Яка доза опромінення організму?

$$1P = 0,88 \text{ рад}, \text{ тоді } D_n = 8,8 \text{ мрад}, D_e = D_n K = 8,8 \text{ мбер} = 0,88 \text{ мкЗв}.$$

### **Зведення дозиметричних величин та їх одиниць.**

**1. Активність випромінювача ( $A$ ).** Одиниця активності – бекерель ( $Bk$ ). Кюрі ( $Ku$ ).  $1 Bk = 1 \text{ розп/с}$ , ( $CI$ );  $1 Ku = 3,7 \cdot 10^{10} Bk$ .

**2. Експозиційна доза ( $D$ ).** Одиниця дози – кулон/кг ( $CI$ ), рентген ( $P$ ).  $1 P = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ .

**3. Поглинута доза ( $D_n$ ).** Одиниця – грей ( $Гр$ ), рад.  $1 Гр = 1 \text{ Дж/кг}$  ( $CI$ ),  $1 \text{ рад} = 0,001 \text{ Гр}$ .

**4. Еквівалентна доза ( $D_e$ ).**  $D_e = K D_n$ . Одиниця  $D_e$  – зіверт ( $Зв$ ) ( $CI$ ), бер.  $1 \text{ бер} = 0,01 \text{ Зв}$ .

**5. Допустимі дози опромінення і міжнародня норми.** Міжнародна комісія радіаційного захисту (МКРЗ) рекомендує як граничне значення допустимої дози – гранично допустиму дозу (ГДД) – разове аварійне опромінення 25 P (25 бер); професійне хронічне опромінення – 5 бер/рік; для населення – 0,5 бер/рік. Це складає 0,006 мбер/год.

Для порівняння: опромінення при рентгенографії зубів відповідає 3 берам, перегляд хокейного матчу по телебаченню – 1 мкбер.

### **Завдання з теоретичної частини**

Джерело радіоактивного  $\gamma$ -випромінювання оцінюється в 2 Ку. Яке радіаційне поле зафіксує дозиметр? Яка поглинута і еквівалентна доза опромінення, якщо відстань від джерела складає 10 м?

## **Експериментальна частина**

Завдання 1. Користуючись технічним описом та інструкцією дозиметра ДП-5Б, СРП-68, вивчити технічні характеристики, будову і правила експлуатації приладу.

Завдання 2. Використовуючи дозиметр ДП-5Б, СРП-68, виконати виміри радіаційного поля в різних точках лабораторії.

Завдання 3. Використовуючи дозиметр ДП-5Б, СРП-68, виконати виміри радіаційного поля в різних точках міста.

Завдання 4. Вивчити технічні характеристики, будову та правила експлуатації комплексу ДП-22-В.

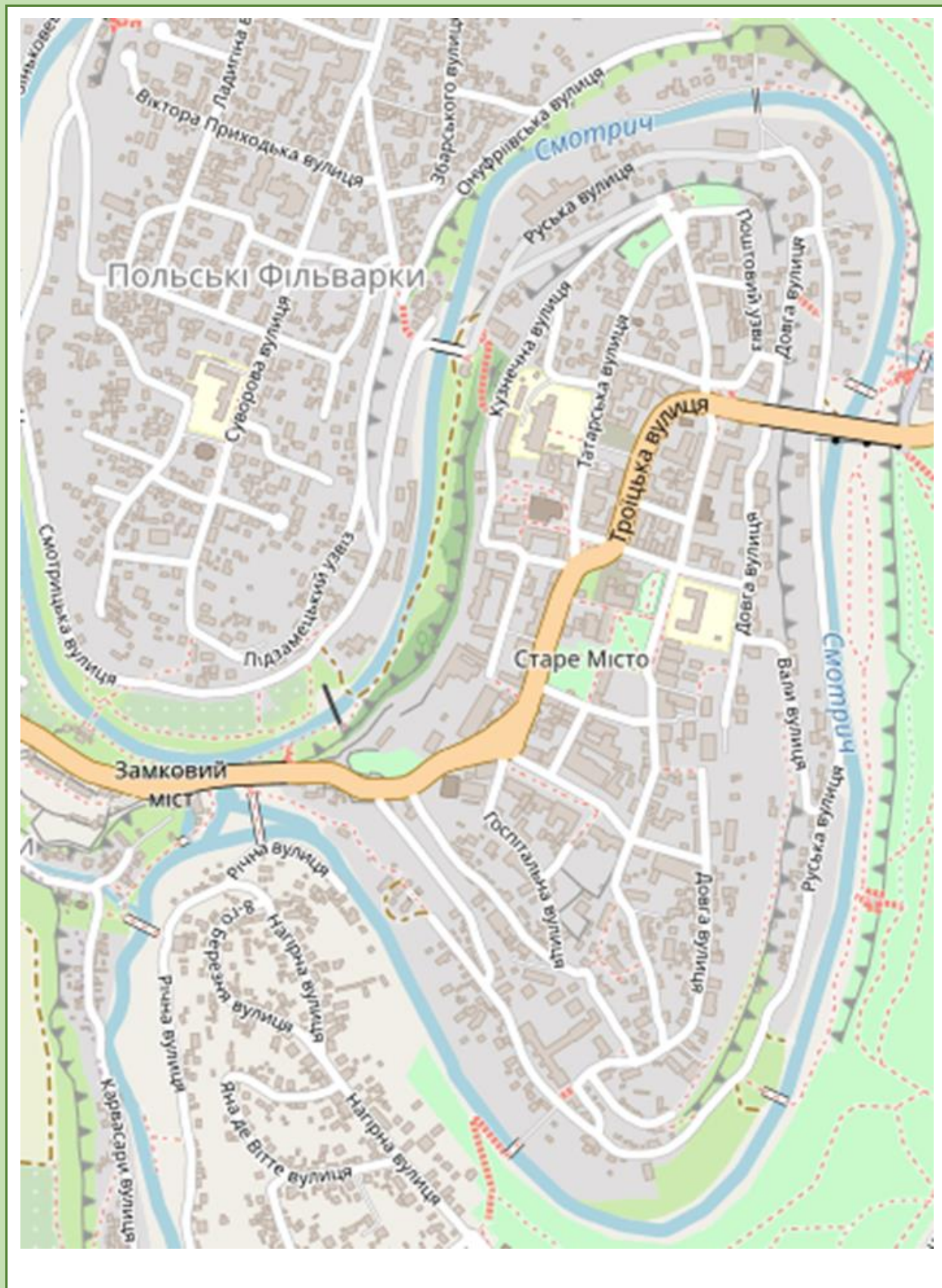
Завдання 5. Виконати зарядку дозиметра ДП-22-В.

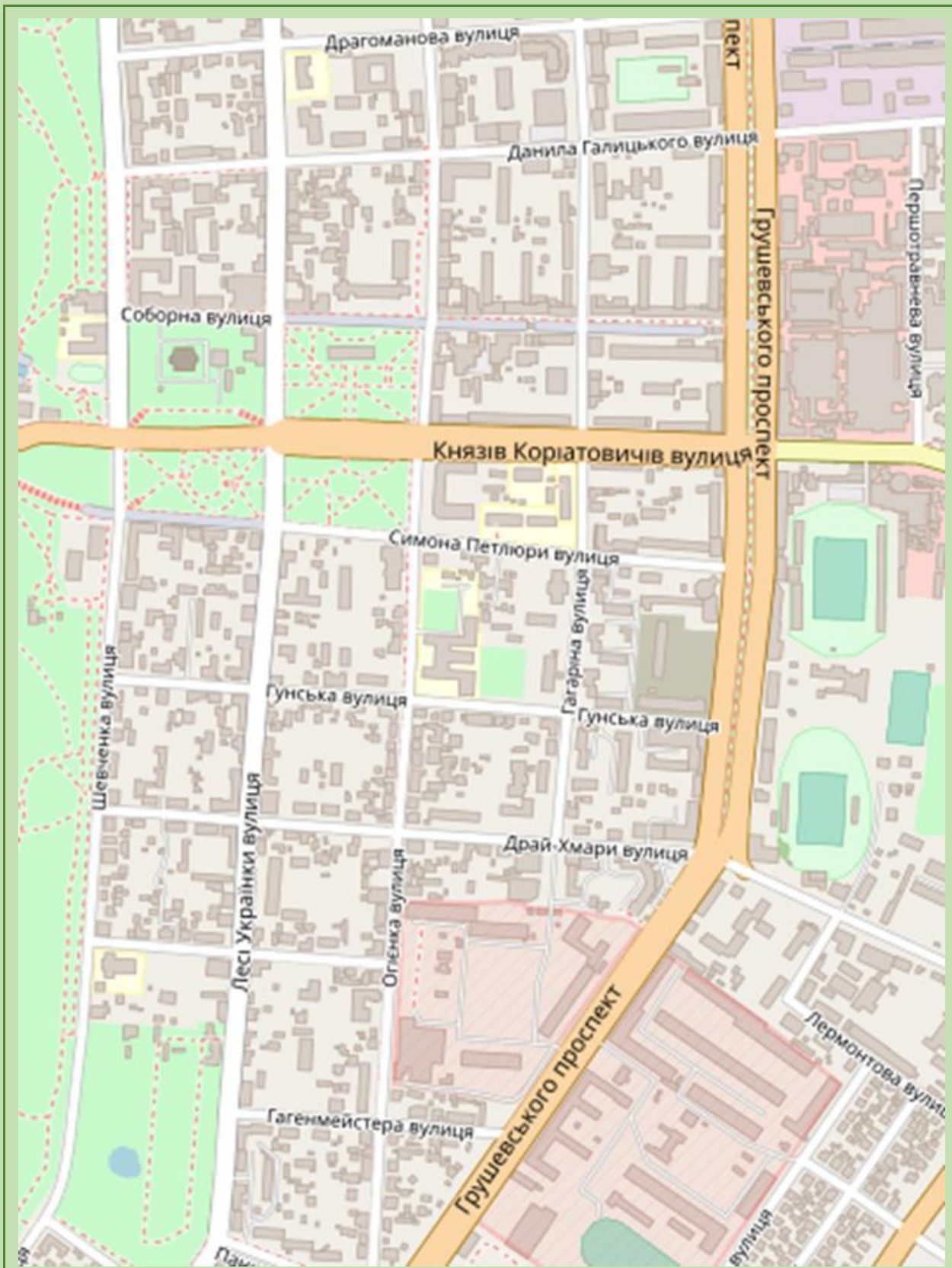
## **Контрольні запитання**

1. Яке призначення дозиметра ДП-5Б? Його технічні характеристики.
2. Комплектність приладу і призначення окремих частин.
3. Догляд за приладом і заходи безпеки.
4. Підготовка приладу до роботи. Порядок виконання вимірів.
5. Будова і принцип дії дозиметра ДП-22-В. Зарядний пристрій і процес зарядки.

## **Література**

1. Радіація і людина. Москва: Знання, 1987. №7.
2. Фізика в школі. 1990. №2.
3. Кабардін О. Практикум по ядерній фізиці. Москва: Просвіта, 1965.
4. Донченко О.С. Лабораторні роботи з фізики. Ядерні випромінювання і дозиметрія, 1966





## САМОСТІЙНА РОБОТА

№ з/п	Назва теми	Форми контролю	Література
1.	Будова та принцип роботи фотоелементів та фотопомножувачів	Реферат	[1-3, 8-9]
2.	Прилади на основі внутрішнього фотоефекту	-//-	[1-3, 8-9]
3.	Прилади із зарядовим зв'язком	-//-	[1-3, 8-9]
4.	Експериментальне підтвердження тиску світла	-//-	[1-3, 8-9]
5.	Принцип невизначеності Гейзенберга (координата-імпульс, та енергія-час)	-//-	[1-3, 8-9]
6.	Експериментальна перевірка принципу невизначеності Гейзенберга	-//-	[1-3, 8-9]
7.	Рівняння Шредінгера для кристалу	-//-	[1-3, 8-9]
8.	Наближені методи рішення рівняння Шредінгера	-//-	[1-3, 8-9]
9.	Поняття ефективної маси та методи її визначення	-//-	[1-3, 8-9]
10.	Види люмінесценції	-//-	[1-3, 8-9]
11.	Практичне використання явища люмінесценції	-//-	[1-3, 8-9]
12.	Постулати Бора	-//-	[1-3, 8-9]
13.	Спектральний аналіз та його використання	-//-	[1-3, 8-9]
14.	Природа рентгенівського випромінювання	-//-	[1-3, 8-9]
15.	Дослід Резерфорда і планетарна модель атома	-//-	[1-3, 8-9]
16.	Історія відкриття протона і нейтрона	-//-	[1-3, 8-9]
17.	Властивості ядерних сил	-//-	[1-3, 8-9]
18.	Прискорювачі елементарних часток	-//-	[1-3, 8-9]
19.	Методи реєстрації радіоактивного випромінювання	-//-	[1-3, 8-9]
20.	Типи ядерних реакцій. Радіоактивні сімейства	-//-	[1-3, 8-9]
21.	Типи ядерних реакторів	-//-	[1-3, 8-9]
22.	Екологічні питання ядерної енергетики	-//-	[1-3, 8-9]
23.	Проблема керованого термоядерного синтезу	-//-	[1-3, 8-9]
24.	Основні характеристики та властивості елементарних часток	-//-	[1-3, 8-9]

---

## ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

---

**Мета** індивідуальних навчально-дослідних завдань (ІНДЗ): виробити та закріпити навички використання теоретичних знань про проходження світлових променів крізь оптичні системи та взаємодію світлових хвиль.

**Тематика** ІНДЗ: З переліку завдань студент обирає тему, яка його цікавить, і готує коротке повідомлення (презентацію). Матеріал для роботи потрібно брати з наукових, науково-популярних журналів та з мережі Інтернет. Ця інформація має доповнювати, розширювати або ж деталізувати той класичний матеріал, який викладений у базових навчальних посібниках.

**Види** ІНДЗ: короткі текстові повідомлення; ілюстрації, оформлені для презентації.

Індивідуальні заняття спрямовані на додаткове та детальне вивчення найважливіших і найскладніших тем і питань курсу квантової, атомної та ядерної фізики. На цих заняттях також розглядаються питання останніх результатів розробки та методів досліджень. Студентам пропонується підготувати доповіді з таких питань:

1. Фізичні явища, що привели до потреби створення квантової фізики.
2. Прилади, що працюють на явищі зовнішнього і внутрішнього фотоэффекту.
3. Методи визначення параметрів фотоелектронних пристроїв.
4. Астрономічні явища, що підтверджують наявність тиску світла..
5. Методи отримання рентгенівського випромінювання.
6. Застосування рентгенівських променів.
7. Вклад І. Пулюя у вивчення властивостей рентгенівського випромінювання.
8. Принцип невизначеності Гейзенберга та його дослідна перевірка.
9. Дослід Девіссона і Джермера та його результати.
10. Ефект Комптона та підтвердження квантової природи випромінювання.
11. Теплові джерела випромінювання та їх характеристики.
12. Оптична пірометрія.

13. Хвилі де Бройля та їх фізичний зміст.
14. Рівняння Шредінгера та принцип суперпозиції.
15. Найпростіші задачі практичного використання рівняння Шредінгера (потенціальні яма, бар'єр).
16. Рух електрона у кристалі.
17. Наближення для розв'язування рівняння Шредінгера.
18. Поняття ефективної маси носіїв заряду та її дослідне визначення.
19. Утворення енергетичних зон у кристалах.
20. Зонна модель провідності металів, напівпровідників та діелектриків.
21. Класична та квантова моделі теплоємності.
22. Квантові явища при низьких температурах (надпровідність та надплинність).
23. Спектральні серії випромінювання атомів.
24. Постулати Бора та їх квантово-механічна інтерпретація.
25. Квантування енергії, моменту імпульсу і проекції моменту імпульсу.
26. Принцип Паулі. Електронні шари складних атомів.
27. Типи хімічного зв'язку та їх особливості.
28. Люмінесценція, її типи і практичне застосування.
29. Спонтанне та індуковане випромінювання.
30. Квантові генератори та їх застосування.
31. Дослід Резерфорда та планетарна модель атома.
32. Прискорювачі заряджених часток.
33. Склад ядра, дефект маси та енергія зв'язку.
34. Ядерні сили та особливості їх прояву.
35. Закони радіоактивного розпаду та правила зміщення.
36. Ядерні реакції та їх типи.
37. Ланцюгові реакції.
38. Історія створення атомної зброї.
39. Типи ядерних реакторів.
40. Атомна енергетика, її розвиток та питання екології.
41. Реакції термоядерного синтезу та умови їх здійснення.
42. Керований термоядерний синтез.



43. Класифікація елементарних часток.
44. Поняття про кваркову модель адронів.
45. Закони збереження у мікросвіті.
46. Сучасна фізична картина світу.

### Порядок подання та захист ІНДЗ

1. Звіт про виконання ІНДЗ подається в окремому зошиті (або на аркушах формату А4) з титульною сторінкою стандартного зразка і внутрішнім наповненням із зазначенням усіх позицій змісту завдання та переліком використаних джерел інформації (або у вигляді презентації).
2. ІНДЗ подається викладачеві, який читає лекційний курс з відповідної дисципліни та приймає екзамен або залік, не пізніше ніж за 2 тижні до екзамену (заліку).
3. Оцінка за ІНДЗ виставляється на заключному практичному занятті з курсу на основі попереднього ознайомлення викладача зі змістом ІНДЗ.
4. Оцінка за ІНДЗ є обов'язковим компонентом оцінки і враховується при виведенні підсумкової оцінки з навчальної дисципліни:

*максимальна оцінка за ІНДЗ виставляється, коли при виконанні роботи студент проявив власну ініціативу і повністю розкрив суть завдання з урахуванням сучасних результатів вивчення оптичних явищ та моделей, що їх пояснюють, а також методи і пристрої, необхідні для їх реалізації та основні напрямки практичного застосування у практичній діяльності людства.*

## ДОВІДКОВІ ДАНІ

Таблиця 1

### *Деякі фізичні сталі*

Стала	Позначення	Числове значення
Гравітаційна стала	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Атомна одиниця маси	<i>а.о.м.</i>	$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Таблиця 2

### *Множники і префікси для утворення кратних і часткових одиниць*

Найменування	Позначення	Множник	Найменування	Позначення	Множник
екса	Е	$10^{18}$	деци	д	$10^{-1}$
пета	П	$10^{15}$	санти	с	$10^{-2}$
тера	Т	$10^{12}$	мілі	м	$10^{-3}$
гіга	Г	$10^9$	мікро	мк	$10^{-6}$
мега	М	$10^6$	нано	н	$10^{-9}$
кіло	к	$10^3$	піко	п	$10^{-12}$
гекто	г	$10^2$	фемто	ф	$10^{-15}$
дека	да	$10^1$	атто	а	$10^{-18}$

Таблиця 3

### *Деякі постійні числа і наближені формули*

Постійні числа	Наближені формули (при $\alpha < 1$ )
$\pi = 3,1416$	$(1 \pm \alpha)^n \approx 1 \pm n\alpha$
$\pi^2 = 9,8696$	$e^\alpha \approx 1 + \alpha$
$\sqrt{\pi} = 1,7725$	$\ln(1 + \alpha) \approx \alpha$
$e = 2,7183$	$\sin \alpha \approx \alpha$
$\lg e = 0,4343$	$\cos \alpha \approx 1 - \alpha^2 / 2$
$\ln 10 = 2,3026$	$\text{tg } \alpha \approx \alpha$

Таблиця 4

## Маси деяких ізотопів, а. о. м.

Ізотоп	Маса	Ізотоп	Маса	Ізотоп	Маса
${}^1_1H$	1,00783	${}^{20}_{10}Ne$	19,99244	${}^{13}_7N$	13,00574
${}^2_1D$	2,01410	${}^{23}_{11}Na$	22,98977	${}^{14}_7N$	14,00307
${}^3_1T$	3,01605	${}^{24}_{11}Na$	23,99097	${}^{16}_8O$	15,99491
${}^3_2He$	3,01603	${}^{27}_{13}Al$	26,98154	${}^{31}_{15}P$	30,97376
${}^4_2He$	4,00260	${}^{28}_{13}Al$	27,97690	${}^{56}_{26}Fe$	55,93490
${}^6_3Li$	6,01512	${}^{28}_{14}Si$	27,97690	${}^{59}_{27}Co$	58,93320
${}^7_3Li$	7,01600	${}^{30}_{14}Si$	29,97377	${}^{60}_{29}Ni$	59,9308
${}^7_4Be$	7,01693	${}^9_4B$	9,01218	${}^{131}_{54}Xe$	130,9051
${}^8_4Be$	8,00531	${}^{10}_5B$	10,01294	${}^{235}_{92}U$	235,0493
${}^{17}_8O$	15,99491	${}^{11}_5B$	11,00930	${}^{238}_{92}U$	238,05353
${}^{19}_9Fe$	18,99840	${}^{12}_6C$	12,0		

Таблиця 5

## Періоди піврозпаду деяких радіоактивних речовин

Вісмут ${}^{210}_{83}Bi$	5,02 доби	Радон ${}^{222}_{86}Rn$	3,82 доби
Іридій ${}^{192}_{77}Ir$	75 діб	Стронцій ${}^{90}_{38}Sr$	28 років
Кальцій ${}^{45}_{20}Ca$	164 доби	Торій ${}^{232}_{90}Th$	$1,39 \cdot 10^{11}$ років
Натрій ${}^{24}_{11}Na$	15,3 год	Уран ${}^{235}_{92}U$	$7,1 \cdot 10^8$ років
Полоній ${}^{210}_{84}Po$	138 діб	Уран ${}^{238}_{92}U$	$4,5 \cdot 10^9$ років
Радій ${}^{226}_{88}Ra$	1600 років		

Таблиця 6

Густина твердих тіл при 293 К ( $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м<sup>3</sup>).

Алюміній	2,69	Олово лите	7,23
Залізо, хімічне чисте	7,86	Сталь лита	7,7-8,0
Латунь	8,3-8,7	Свинець	11,22-11,44
Лід (0 °С)	0,91	Срібло	10,42-10,57
Мідь електролітична	8,88-8,96	Цинк	6,86-7,24
Нікель	8,4-9,2	Чавун	6,6-7,3

Таблиця 7

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	б	а	а	б	в	б	а	а	а	а	б
2	а	в	б	а	б	а	в	б	а	б	б
3	в	в	г	в	в	в	б	в	в	б	б
4	г	а	в	а	а	б	а	а	б	а	в
5	в	а	в	б	б	г	а	в	б	в	б
6	г	б	б	в	г	в	б	б	а	б	в
7	б	г	а	б	а	а	г	а	б	б	в
8	в	а, в, г	б	б	в	б	а	б	1-б, 2-в, 3-а	в	а
9	в	а	в	г	а	г	в	а	б	а	б
10	б	в	а	б	б	а	б	б	в	а	а

---

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

---

### *Основна література*

1. Дущенко В.П., Кучерук І.М. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. Київ: Вища шк., 1991.
2. Сівухін Д.В. Загальний курс фізики. Москва: Наука. Т. 1-5.
3. Савельєв І.В. Курс загальної фізики. Москва: Наука. 1979-1987. Т. 1-3.
4. Волькенштейн В.С. Збірник задач по загальному курсу фізики. Москва: Наука, 1985.
5. Збірник задач по курсу загальної фізики / під ред. М.С. Цедрика. Москва: Просвіта, 1989.
6. Загальний курс фізики. Збірник задач / І.П. Гаркуша, І.Т. Горбачук, В.П. Курінний та ін.; за ред. І.П. Гаркуші. Київ: Техніка, 2003. 560 с.
7. Загальний курс фізики. Збірник задач: навч. посібник / за ред. І.Т. Горбачука. Київ: Вища школа. 1993. 359 с.

### *Додаткова література*

8. Іродов І.Е. Збірник задач по загальній фізиці. Москва: Наука, 1988.
9. Дущенко В.П., Горбачук І.Т. та ін. Фізичний практикум. Київ, 1984.
10. Фізичний практикум / за ред. В.П. Дущенка. Київ: Вища шк., 1981-1984, Ч. 1-2.
11. Корсунський В.І. Оптика і атомна фізика. Москва: Вища школа, 1978, 348 с.
12. Бушок Г.Ф., Півень Г.Ф. Курс фізики. Ч. 2. Електрика, оптика і атомна фізика. Київ: Вища школа, 1969. 384 с.
13. Корсак К.В. Якісні і графічні задачі з основ електродинаміки, оптики й атомної фізики. Київ: Освіта, 1992, 127 с.
14. Рачковський О.М., Криськов Ц.А. Фізика атома, атомних явищ, ядра та елементарних частинок (Лабораторний практикум). Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2014. 68 с.

Міністерство освіти і науки України  
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

НАВЧАЛЬНЕ ЕЛЕКТРОННЕ ВИДАННЯ

**РАЧКОВСЬКИЙ Олег Михайлович,**  
старший викладач кафедри фізики Кам'янець-Подільського  
національного університету імені Івана Огієнка

**ОПТАСЮК Сергій Васильович,**  
кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
завідувач кафедри фізики Кам'янець-Подільського  
національного університету імені Івана Огієнка

**ЧОРНА Оксана Григорівна,**  
кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри фізики  
Кам'янець-Подільського національного  
університету імені Івана Огієнка

# **ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА**

## **«АТОМНА І ЯДЕРНА ФІЗИКА»**

***(ТЕОРІЯ + ПРАКТИКА + ЕКСПЕРИМЕНТ)***

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ СТУДЕНТІВ  
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОГО ФАКУЛЬТЕТУ,  
СПЕЦІАЛЬНОСТІ: 014 СЕРЕДНЯ ОСВІТА (ФІЗИКА)

***Електронне видання***

---

Підписано 23.02.2023 р. Гарнітура «Таймс».  
Об'єм даних 2,6 Мб. Обл.-вид. арк. 5,1. Зам. № 1023.

Кам'янець-Подільський національний університет  
імені Івана Огієнка,  
вул. Огієнка, 61, м. Кам'янець-Подільський, 32300.  
Свідоцтво серії ДК № 3382 від 05.02.2009 р.

Виготовлено в Кам'янець-Подільському національному  
університеті імені Івана Огієнка,  
вул. Огієнка, 61, м. Кам'янець-Подільський, 32300.