

Міністерство освіти і науки , молоді та спорту України  
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

**О.І. Богатирьов**  
**Л.О. Кулик**  
**А.В. Ткаченко**

**Фізика атома**

Розрахунково-графічні роботи  
Навчально-методичний посібник  
для студентів фізичних спеціальностей

Черкаси-2013

УДК 53:378.147.88  
ББК 22.3 р30  
Б 73

**Рецензенти:**

Корнієнко С.В. – кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри фізики  
Черкаського національного університету  
імені Богдана Хмельницького

Колінько С.О. – кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри фізики  
Черкаського державного технологічного університету

**О.І. Богатирьов , Л.О. Кулик, А.В. Ткаченко**

Б73 Фізика атома : Навчально-методичний посібник для  
студентів фізичних спеціальностей . — Черкаси : Вид. від. ЧНУ імені Богдана  
Хмельницького, 2013. –68с.

ISBN 978-966-353-312-4

Посібник містить розгорнуті методичні рекомендації та завдання до  
контрольних та розрахунково-графічних робіт з фізики атома.

Для студентів фізичних спеціальностей університетів.

УДК 53:378.147.88

ББК 22.3р 30

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Черкаського національного університету  
імені Богдана Хмельницького  
(протокол № 4 від 29 квітня 2013 року)

ISBN 978-966-353-312-4

© ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2013

© О. І. Богатирьов, 2013

© Л. О. Кулик, 2013

©А. В. Ткаченко, 2013

## Зміст

Вступ.....	4
<b>1. Зміст дисципліни.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Рекомендована література</b>	
2.1. Основна література.....	8
2.2. Додаткова література.....	8
<b>3. Теоретичний матеріал, знання якого необхідне для успішного виконання роботи</b>	
3.1. Основні експериментальні закономірності та їх тлумачення.....	9
3.1.1. Теплове випромінювання.....	9
3.1.2. Фотоэффект.....	11
3.1.3. Рентгенівське випромінювання.....	12
3.1.4. Тиск світла.....	13
3.2. Будова атомів.....	14
3.2.1. Атом Гідрогену за Бором.....	15
3.2.2. Рівняння Шредінгера. Квантові числа електрона в атомі. Таблиця Менделєєва .....	15
3.3. Хвильові властивості речовини.....	18
3.3.1. Хвилі де Бройля .....	18
3.3.2. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга .....	19
3.4. Будова і властивості молекул.....	19
3.5. Квантові властивості речовин.....	21
3.5.1. Спонтанне та індуковане випромінювання.....	21
3.5.2. Надпровідність.....	22
<b>4. Приклади розв'язування задач .....</b>	<b>23</b>
<b>5. Розподіл задач за варіантами .....</b>	<b>40</b>
<b>6. Задачі для контрольної роботи.....</b>	<b>42</b>
<b>7. Таблиці деяких фізичних величин.....</b>	<b>67</b>

## ВСТУП

Фізика атома – один з основних розділів сучасної фізики.

Вивчення будови атома, атомних явищ розпочалось з кінця XIX сторіччя завдяки, передусім, таким видатним фізикам як Дж. Дж. Томсон, А. Ейнштейн, Е. Резерфорд, Н. Бор, В. Паулі та ін.. Зусиллями цих вчених була створена нова фізична теорія, яку назвали квантовою фізикою. Вона вивчає процеси, що відбуваються у мікросвіті. Оскільки властивості макроскопічних тіл зумовлені рухом і взаємодією мікрочастинок, то закони квантової фізики дають змогу пояснити більшість явищ макросвіту.

Успіхи квантової фізики відіграли важливу роль у науково-технічній революції, у розумінні єдності світу, побудові єдиної фізичної картини світу.

Основною метою дисципліни є усвідомлення студентами корпускулярно-хвильового дуалізму світла, зокрема квантового характеру взаємодії світла з речовиною.

Оскільки сучасна атомна фізика є основою вчення про будову речовини і полів і тісно пов'язана з філософськими проблемами – матеріальності простору, перервності та неперервності матерії, єдності протилежностей, дуалізму частинок і хвиль, то основним завданням даної дисципліни є продовження формування у свідомості студентів природничо-наукової картини світу, визначення місця людини у ньому.

Студенти повинні ознайомитись принаймні з основною літературою з дисципліни, розвинути навички самостійного пошуку літературних джерел.

Важливою складовою у розумінні законів та понять фізики атома є уміння студента розв'язувати задачі. З метою контролю та оцінювання таких умінь навчальними планами підготовки бакалаврів передбачено самостійне домашнє виконання студентами розрахунково-графічної роботи з фізики атома.

У цьому посібнику наведено таку кількість задач, яка охоплює практично всю програму і дає змогу кожному студенту працювати за окремим варіантом.

Усього пропонуємо 40 приблизно однакових за складністю варіантів. Кожен з них складається з 7 задач. Номер варіанта для студента визначає викладач.

Розв'язок задачі повинен містити, насамперед, достатньо повне пояснення із супроводом графіків, схем, рисунків. Саме за рівнем та якістю цієї частини розв'язку викладач оцінює ступінь розуміння студентом фізичних законів та явищ.

При оформленні роботи слід користуватися існуючим стандартом. Кожну задачу потрібно розв'язати у загальному вигляді, отримати кінцевий вираз для обчислення, а вже потім підставити необхідні числові величини та виконати обрахунки. При цьому слід користуватися Міжнародною системою одиниць (СІ). Поряд з цим, у атомній фізиці допускається використання і позасистемних одиниць (eВ, а.о.м.)

При підстановці в розрахункову формулу, а також при записі відповіді числове значення велечин слід записувати як добуток десяткового дробу з однією значущою цифрою перед комою на відповідну степінь десяти.

Наприклад, замість 3520 потрібно записати  $3.52 \cdot 10^3$ , замість 0,00129 записати  $1.29 \cdot 10^{-3}$ ; і т.п. Одержану величину необхідно проаналізувати, щоб переконатися на відповідність її умові задачі та потрібній розмірності.

Цей посібник містить також необхідний теоретичний матеріал, з яким потрібно ознайомитись у першу чергу, та значну кількість прикладів розв'язування типових фізичних задач. Ці приклади слід уважно розглянути як з точки зору оформлення роботи, так і для порівняння своїх задач зі схожими розв'язаними.

У додатках наведені деякі константи та необхідні таблиці фізичних величин.

## 1. ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

Відповідно до діючих програм підготовки бакалаврів студенти, вивчаючи фізику, повинні засвоїти наведений нижче матеріал з розділу «Фізика атома»

*Вступ.*

Розвиток атомістичних уявлень. Атоми і молекули. Специфіка законів мікросвіту.

*Розвиток квантових уявлень.*

Основні експериментальні закономірності та їх тлумачення. Теплове випромінювання, його закономірності. Випромінювання абсолютно чорного тіла. Закон Стефана-Больцмана. Закон зміщення Віна. Формула Релея-Джінса. Формула Планка.

Фотоефект. Рівняння Ейнштейна. Застосування фотоефекту.

Рентгенівське випромінювання. Гальмівне та характеристичне випромінювання, їх спектри. Ефект Комптона. Застосування рентгенівських променів.

*Будова атомів.*

Досліди Резерфорда. Планетарна модель атома. Постулати Бора. Досліди Франка і Герца. Модель атома водню за Бором. Спектральні серії випромінювання атомарного водню. Зведена маса. Спін електрона. Досліди Штерна і Герлаха. Квантові числа електрона в атомі. Правила відбору. Орбітальні та власні механічні і магнітні моменти електрона. Принцип Паулі. Періодична система елементів Менделєєва. Багатоелектронні атоми. Принцип відповідності.

*Хвильові властивості речовини.*

Хвилі де Бройля. Експериментальне підтвердження ідеї де Бройля. Корпускулярно-хвильовий дуалізм. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга. Основні уявлення квантової механіки. Рівняння Шредінгера. Хвильова функція і її фізичний зміст. Найпростіші одномірні задачі квантової

механіки: прямокутна потенціальна яма, гармонічний осцилятор, тунельний ефект.

*Квантова механіка системи тотожних частинок.*

Симетричні та антисиметричні хвильові функції. Ферміони і бозони. Поняття про квантові статистики. Надпровідність. Надтекучість. Бозе-конденсат.

*Будова і властивості молекул.*

Види рухів у молекулі. Молекулярні спектри. Хімічні зв'язки і валентність.

*Атоми та молекули у зовнішніх полях.*

Ефекти Зеемана і Штарка. Електронний парамагнітний резонанс. Ядерний магнітний резонанс.

*Квантові властивості твердих тіл.*

Періодичність потенціалу та одноелектронних функцій для кристалічної ґратки. Утворення енергетичних зон у кристалах. Зонні моделі металів, напівпровідників, діелектриків. Рівні Фермі. Електропровідність напівпровідників. Р-п-перехід. Напівпровідникові прилади. Люмінесценція. Правило Стокса. Лазерне випромінювання. Лазерна спектроскопія та її застосування в атомній фізиці.

## 2. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Під час вивчення теоретичного матеріалу рекомендуємо користуватися наступною літературою.

### 2.1 Основна література

- 2.1.1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т. 3.: Оптика. Квантова фізика. — К. : Техніка, 2006. —518 с.
- 2.1.2. Кучерук І.М., Дущенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. — К.: Вища школа, 1991. — 463с.
- 2.1.3. Білий М.І.,Скубенко А.Ф. Атомна фізика. Оптика. — К.: Вища школа, 1973. — 396с.
- 2.1.4. Хмелюк К.Д., Цициліано Д.Д. Фізика атома і твердого тіла. — К.: Вища школа, 1974. — 231с.
- 2.1.5. Гаркуша І.П., Горбачук І.Т. та ін.. Загальний курс фізики. Збірник задач. — К.: Техніка, 2003 — 560с.
- 2.1.6. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. — М.: Наука, 1985. — 464с.
- 2.1.7. Цедрик М.С. Сборник задач по физике. — Минск: Высшая школа, 1989. — 270с.

### 2.2 Додаткова література

- 2.2.1. Шпольский Э. В. Атомная физика, т. I, — М.: Наука, 1984. — 542с.
- 2.2.2. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки. — К.: Либідь, 1995. — 352с.
- 2.2.3 Вакарчук І.О. Квантова механіка.— Львів: ЛДУ ім. І. Франка,1998.— 616с.
- 2.2.4. Сивухин Д.В. Сборник задач по общему курсу физики. Атомная физика. Физика ядра и элементарных частиц. — М.: Наука, 1981.— 224с.



### 3. ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ, ЗНАННЯ ЯКОГО НЕОБХІДНЕ ДЛЯ УСПІШНОГО ВИКОНАННЯ РОБОТИ

#### 3.1. Основні експериментальні закономірності та їх тлумачення

##### 3.1.1. Теплове випромінювання

3.1.1.1. *Випромінювальна здатність*  $E(T)$  – енергія, яку випромінює тіло при температурі  $T$  з одиниці поверхні за одиницю часу.

*Спектральна випромінювальна здатність*  $e(\nu, T)$  – енергія, яку випромінює тіло при температурі  $T$  з одиниці поверхні за одиницю часу у вузькому інтервалі частот від  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ .

Зв'язок між  $E(T)$  і  $e(\nu, T)$ :

$$E(T) = \int_0^{\infty} e(\nu, T) d\nu$$

*Спектральна поглинальна здатність*  $a(\nu, T)$  – частка падаючої на тіло енергії, яку воно поглинає у діапазоні частот від  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ .

*Спектральна відбивна здатність*  $r(\nu, T)$  – частка енергії, яка відбивається від тіла у діапазоні частот від  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ .

*Спектральна пропускна здатність тіла*  $D(\nu, T)$  – частка падаючої на тіло енергії, яка проходить крізь тіло у вузькому діапазоні частот від  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ .

Сума  $a(\nu, T) + r(\nu, T) + D(\nu, T) = 1$

Якщо  $a(\nu, T) = 1$ , або  $A(T) = 1$ , то тіло вважають абсолютно чорним, де  $A(T)$  – поглинальна здатність тіла.

3.1.1.2. Г. Кірхгоф установив, що відношення або не залежить від природи тіл і для всіх тіл, які знаходяться при однаковій температурі, є однаковим. Для абсолютно чорного тіла ( $a=A=1$ ) закон Кірхгофа набуває вигляду:

де  $\varepsilon(\nu, T)$  та  $\varepsilon(T)$  – відповідно спектральна та повна випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла.

3.1.1.3. Для абсолютно чорного тіла Й. Стефан і Л. Больцман встановили, що :

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

$$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad \text{К}^4$$

де  $T$  – абсолютна температура тіла, а  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – стала Стефана – Больцмана.

Для реальних тіл

$$\varepsilon(T) = \kappa \sigma T^4, \quad \text{де } \kappa - \text{коефіцієнт сірості тіла.}$$

3.1.1.4. Відповідно до закону В. Віна довжина хвилі  $\lambda_{\text{max}}$ , на яку припадає максимум спектральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла, з підвищенням температури зменшується:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b,$$

де  $b = 2,89 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – стала у законі зміщення Віна.

3.1.1.5. Для абсолютно чорного тіла Дж. Релей і Дж. Джинс теоретично, на основі класичних уявлень, встановили, що спектральна випромінювальна здатність повинна визначатися із співвідношення:

$$\varepsilon(\nu, T) = 2\pi \left(\frac{\nu}{c}\right)^2 \kappa T^3 \quad (\text{формула Релея – Джинса}),$$

де  $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – стала Больцмана. Проте експериментальна перевірка показала, що ця формула непридатна для великих частот (ультрафіолетова катастрофа).

М. Планк емпіричним шляхом, увівши поняття кванта, одержав вірний вираз для визначення спектральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла:

(формула Планка),

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

### 3.1.2. Фотоефект

3.1.2.1. Явище звільнення електронів з речовини під дією світла називається фотоефектом. Розрізняють зовнішній і внутрішній фотоефект.

Зовнішній фотоефект відбувається в металах і полягає у звільненні електронів з поверхні металу при його освітленні. Метал при цьому стає позитивно зарядженим.

При внутрішньому фотоефекті електрони назовні не виходять, електрична нейтральність тіла не порушується.

3.1.2.2. Для зовнішнього фотоефекту А. Ейнштейн встановив, що енергія падаючого на метал світлового кванта  $h\nu$  витрачається, по-перше, на видалення електрона з речовини (робота виходу  $A$ ) і, по-друге, на надання

цьому електрону кінетичної енергії  $\frac{m_e v^2}{2}$ . Тобто

$$h\nu = A + \frac{m_e v^2}{2},$$

де  $m_e$  і  $v$  – маса і швидкість фотоелектрона.

3.1.2.3. Із останньої формули слідує, що явище фотоефекту буде спостерігатися лише тоді, коли енергія фотона буде щонайменша рівна роботі виходу:

$$h\nu_{\min} = h \frac{c}{\lambda_{\max}} \geq A$$

Частоту  $\nu_{\min}$  або довжину хвилі  $\lambda_{\max}$  називають червоною межею фотоелектру.

3.1.2.4. З рівняння Ейнштейна слідує також, що для унеможливлення виходу фотоелектронів за межі металу до нього слід прикласти додатну гальмівну (затримуючу) напругу  $U_{\Gamma}$ , величина якої визначається зі співвідношення:

$$eU_{\Gamma} = \frac{m_e v^2}{2}.$$

Тоді 
$$h\nu = A + eU_{\Gamma}; U_{\Gamma} = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e}.$$

### 3.1.3. Рентгенівське випромінювання

3.1.3.1. Закон збереження енергії при одержанні рентгенівського випромінювання має вигляд:

$$\frac{m_e v^2}{2} = Q + h\nu.$$

Кінетична енергія електрона, яку він отримав за рахунок зовнішнього

електричного поля ( $\frac{m_e v^2}{2} = eU$ ), витрачається частково на нагрівання антикатада (анода)  $Q$  частково на генерацію випромінювання  $h\nu$ . Тоді

$$eU = Q + h\nu.$$

Значення  $U$  досягає десятків і сотень кіловольт. Частота рентгенівських променів  $\nu$  лінійно зростає зі збільшенням  $U$ . Чим більша різниця потенціалів  $U$ , тим «жорсткіші» будуть рентгенівські промені. «Найжорсткішими» вони будуть за умови, що  $Q=0$ . Тоді

$$eU = h\nu_{\max} = h \frac{c}{\lambda_{\min}}.$$

Величина  $\lambda_{min} = \frac{hc}{e \cdot U}$  називається короткохвильовою межею рентгенівського випромінювання.

3.1.3.2. Збільшення довжини хвилі при комптонівському розсіянні рентгенівських променів визначається за формулою:

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta),$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі, що падає на речовину;  $\lambda_1$  – довжина хвилі розсіяного під кутом  $\theta$  рентгенівського випромінювання;  $m_0$  – маса спокою електрона.

Величина  $\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$  називається комптонівською довжиною хвилі.

3.1.3.3. При проходженні рентгенівського випромінювання крізь шар речовини завтовшки  $d$  його інтенсивність зменшується за експоненціальним законом:  $I = I_0 \cdot e^{-k d}$ ,

де  $k$  – коефіцієнт поглинання, який залежить від довжини хвилі променів і

$$k = k_m \cdot \rho, \quad k_m$$

від густини речовини  $\rho$ :  $k_m$  – масовий коефіцієнт поглинання.

3.1.3.4. Дифракція рентгенівських променів описується рівнянням Вульфа-Бреггів:

$$2d \sin \varphi = m \lambda,$$

де  $d$  – відстань між атомними площинами,  $\varphi$  – кут ковзання,  $m$  – порядок спектра,  $\lambda$  – довжина хвилі.

3.1.3.5. Короткохвильова межа  $\lambda_{min}(\nu_{max})$  суцільного рентгенівського спектра визначається із формули:

$$eU = \frac{hc}{\lambda_{min}} = h\nu_{max}$$

де  $U$  – прискорювальна напруга.

3.1.3.6. Для характеристичного рентгенівського випромінювання Мозлі показав, що довжина хвилі визначається формулою:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$Z - a$$

де  $R$  – стала Рідберга,  $a$  – постійна екранування (для К серії  $a=0,97$ ),

$Z$  – порядковий номер елемента антикатада.

### 3.1.4. Тиск світла

Тиск світла  $p$  може бути визначений як на основі класичної електродинаміки, так і в рамках квантових уявлень про світло.

3.1.4.1. Якщо на поверхню  $S$  під кутом  $\alpha$  падає світловий потік  $\Phi$ , то

$$p = \frac{E \cos^2 \alpha}{c} = \frac{I \cos^2 \alpha}{c}$$

де  $c$  – швидкість світла,  $E$  – освітленість поверхні,  $I$  – інтенсивність падаючого випромінювання,  $\rho$  – коефіцієнт відбиття світла.

Для дзеркальних поверхонь  $\rho = 1$ , для абсолютно чорних  $\rho = 0$ .

Якщо світловий потік падає нормально на поверхню ( $\alpha = 0$ ), то

$$p = \frac{E}{c} = \frac{I}{c}$$

3.1.4.2. Із квантових уявлень слідує:

— енергія кванта світла  $E$  зв'язана з частотою  $\nu$  співвідношенням:

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

— маса фотона:

$$m_{\Phi} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c};$$

— імпульс фотона:

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

Оскільки тиск світла зумовлений зміною імпульсу фотонів при поглинанні та відбитті їх поверхнею тіла, то

$$p = n \cdot h \cdot \nu (1 + \rho) \cdot \cos^2 \alpha = n \cdot h \frac{c}{\lambda} (1 + \rho) \cos^2 \alpha,$$

де  $n$  — кількість фотонів, що падають на одиницю поверхні за одиницю часу. При ( $\alpha = 0$ ):

$$p = n \cdot h \cdot \nu (1 + \rho) = n \cdot h \frac{c}{\lambda} (1 + \rho).$$

## 3.2. Будова атомів

### 3.2.1 Атом Гідрогену за Бором

3.2.1.1. З метою пояснення будови атома водню та воднеподібних іонів Н.Бор припустив, що атом не може знаходитись у будь-яких довільних станах, а лише у цілком певних (стаціонарних) станах, коли він не випромінює світло. Випромінювання може відбутися квантами  $h\nu$  у випадку переходу атома із

## E

стаціонарного стану з більшою енергією у стан з меншою енергією

## E<sub>k</sub>

:

## E<sub>k</sub>

Стаціонарними є ті орбіти електрона в атомі, які задовольняють умову:

$$m_e v \cdot r = \frac{h}{2 \cdot \pi} \cdot n, \quad (n = 1, 2, 3 \dots).$$

де  $m_e$ ,  $v$  і  $r$  — відповідно маса електрона, його швидкість і радіус орбіти.

3.2.1.2. Виходячи з останнього рівняння та враховуючи, що електрон рухається у центральному полі ядра, можна визначити радіус його орбіти та енергію на цій орбіті:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi \cdot Z e^2 m_e} \cdot n^2,$$

$$E_n = - \frac{m_e Z^2 e^4}{2 \cdot \pi^2 \epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

3.2.1.3. Якщо електрон переходить зі стану з більшою енергією у стан з меншою енергією, то частота випромінюваного світла буде:

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h},$$

а довжина хвилі визначатиметься рівнянням:

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



де  $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ .

3.2.1.4. Для водню  $Z = 1$  і в його спектрі спостерігаються наступні серії ліній:

при  $k = 1$  і  $m = 2, 3, 4, \dots$  — серія Лаймана в ультрафіолетовій області спектра;

при  $k = 2$  і  $m = 3, 4, 5, \dots$  — серія Бальмера у видимій області спектра;

при  $k = 3$  і  $m = 4, 5, 6, \dots$  — серія Пашена в інфрачервоній області спектра;

при  $k = 4$  і  $m = 5, 6, 7, \dots$  — серія Бреккета в інфрачервоній області спектра;

при  $k = 5$  і  $m = 6, 7, 8, \dots$  — серія Пфунда в далекій інфрачервоній області спектра;

при  $k = 6$  і  $m = 7, 8, 9, \dots$  — серія Хемфрі в дуже далекій інфрачервоній області спектра.

### 3.2.2 Квантові числа електрона в атомі.

#### Таблиця Менделєєва.

3.2.2.1 Рух частинки у потенціальному силовому полі описується рівнянням

Е. Шредінгера:

де  $\Psi$  — хвильова функція,  $m$  — маса частинки,  $U(r)$  — потенціальна енергія

частинки (наприклад, для електрона в атомі водню).

Хвильова функція (псі-функція) є функцією координат і обов'язково часу, тобто  $\Psi = \Psi(x, y, z, t)$ . Це деякий допоміжний символ, який безпосередньо не вимірюється.

У випадку, коли усі спостережувані фізичні параметри з часом не змінюються (стаціонарні стани), рівняння Шредінгера набуває вигляду:

$$\Delta\varphi + \frac{2m}{\hbar^2} (\varepsilon - U(r))\varphi = 0,$$

де  $\varepsilon$  – повна енергія частинки, а  $\varphi$  є функцією лише координат.

3.2.2.2 Для атома водню або воднеподібних іонів стаціонарне рівняння Шредінгера має вигляд:

$$\Delta\varphi + \frac{2m}{\hbar^2} (\varepsilon + \dots) \varphi = 0,$$

де  $m = -$  приведена маса електрона.

Розв'язки рівнянь Шредінгера для атома водню залежать від трьох чисел, які одержали назву квантових:  $n, \ell, m$ .  $n$  – головне квантове число,  $\ell$  – орбітальне або побічне квантове число,  $m$  – орбітальне магнітне число.

Ці числа можуть набирати лише такі цілі значення:

$$n = 1, 2, 3, 4 \dots$$

$$\ell = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1;$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell.$$

Крім руху навколо ядра, електрон рухається ще й навколо власної осі. Характеристикою цього руху є четверте квантове число  $s$  (спін), яке може мати

лише два значення  $s = \frac{\pm 1}{2}$ . Таким чином, повний набір квантових чисел – чотири :  $n, \ell, m, s$ .

3.2.2.3. Оскільки електрон в атомі знаходиться у двох рухах: навколо ядра (орбітальний рух) та навколо власної вісі (власний рух) і електрон має заряд, то виникають чотири характеристики такого руху: орбітальний механічний момент і орбітальний магнітний момент та власний механічний момент і власний магнітний момент.

Орбітальний механічний момент  $M_\ell$  визначається через квантове число  $\ell$ :

Орбітальний магнітний момент  $\mu_\ell$  електрона зв'язаний із орбітальним механічним моментом:

$$\mu_\ell = -\frac{e}{2m_e} \cdot M_\ell = -\frac{e\hbar}{2m_e} \sqrt{\ell(\ell+1)} = -\mu_B \sqrt{\ell(\ell+1)},$$

де  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 0,927 \cdot \frac{10^{-28} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}}{\square}$  (магнетон Бора). Знак “мінус”

означає, що напрям вектора магнітного момента протилежний напрямку вектора механічного момента.

Власний механічний момент  $M_s$  визначається через квантове число  $s$ :

Власний магнітний момент електрона  $\mu_s$ :

$$\mu_s = 2\mu_B \sqrt{s(s+1)}.$$

Просторове квантування орбітального механічного моменту визначає магнітне квантове число  $m$ :

$$M_{\ell z} = m\hbar.$$

Просторове квантування орбітального магнітного моменту електрона:

$$M_{eZ} = M_B \cdot Z^2$$

3.2.2.4. Розташування електронів у атомі підпорядковане двом принципам: принципу мінімуму енергії і принципу Паулі. Перший принцип указує на те, що електрони у першу чергу займають місця з найменшою енергією. Принцип же Паулі полягає в тому, що в атомі не може бути навіть двох електронів, які мали однакові всі чотири квантові числа.

Електрони в атомі утворюють електронні оболонки. Кількість електронів в оболонці визначається через головне квантове число  $n$ , а саме  $2n^2$ . Максимальна кількість електронів на оболонці (шарі) наступна:

$n=1$  (K- шар) 2 стани;

$n=2$  (L - шар) 8 станів;

$n=3$  (M -шар) 18 станів;

$n=4$  (N -шар) 32 стани;

Оболонки складаються з підоболонок (підшарів). Кількість електронів на підшарі визначається виразом  $2(2\ell+1)$ . Так, при

$\ell=0$  (підшар s) на оболонці може перебувати не більше 2 електронів;

$\ell=1$  (підшар p)— 6 електронів;

$\ell=2$  (підшар d)—10 електронів;

$\ell=3$  (підшар f)— 14електронів;

Загальна кількість електронів у атомі відповідає порядковому номеру у таблиці Менделєєва. Так, наприклад, в атомі натрію 11 електронів і вони розташовані на оболонках і підоболонках наступним чином:  $1s^2 2s^2 p^6 3s^1$ .

### 3.3. Хвильові властивості речовини

#### 3.3.1.Хвилі де Бройля

3.3.1.1.Луї де Бройль припустив, що кожному рухому частинку масою  $m$ , яка рухається зі швидкістю  $v$ , можна уявити як хвилю з довжиною:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Ця гіпотеза підтвердилася дослідями К. Девіссона і Л. Джермера.

У загальному випадку маса є релятивістською величиною:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Зарядженим частинкам (електронам, протонам, іонам) швидкість надають за рахунок електричного поля. При різницях потенціалів  $V \leq 10^4$  В маса частинок майже не відрізняється від маси спокою. Для електрона, наприклад,

$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$ . Тоді, довжина хвилі де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2eUm_e}} = \frac{12,3}{\sqrt{U}} \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

### 3.3.2. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга

3.3.2.1. Виходячи з корпускулярно-хвильового дуалізму мікросвіту, В. Гейзенберг показав, що одночасне точне визначення координати мікрочастинки і її імпульсу неможливе. Це твердження отримало назву “співвідношення невизначеностей”.

Для координат та імпульсів такі співвідношення мають вигляд:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar,$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar,$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar,$$

де  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  — невизначеності координат;  $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$  — невизначеності проєкцій імпульсів на відповідні вісі.

Співвідношення невизначеностей для енергії та часу:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

де  $\Delta E$  — невизначеність енергії квантового стану;  $\Delta t$  — час життя системи у цьому стані.

### 3.4. Будова і властивості молекул

3.4.1. Молекула — найменша частинка речовини, яка володіє усіма її хімічними і фізичними властивостями. Молекула може складатися з однакових або різних атомів, об'єднаних хімічними зв'язками (іонним, ковалентним, металевим та ін.). Молекулярні спектри смугасті.

Енергія молекули є сумою:

де — енергія станів електронів; — енергія коливальних рухів у середині молекули; — енергія обертального руху молекули. При цьому

Для двохатомної молекули:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (k -$$

де  $\omega$  — власна частота малих коливань атомів у молекулі;  
 коефіцієнт жорсткості молекули,  $M$  — її зведена маса);

$n$  — коливальне квантове число молекули.

Обертальна енергія двохатомної молекули:

$$r(r+1),$$

де  $I$  — момент інерції молекули відносно вісі, що проходить через її центр;  $r$  — обертальне квантове число,  $r = 0, 1, 2, 3 \dots$

3.4.2. При комбінаційному розсіянні світла у лінійчатому спектрі, крім основної лінії, з'являються симетрично розташовані з обох сторін додаткові лінії, які одержали назву сателіти або супутники. Супутник, який зміщений у бік довгих хвиль, називають стоксовим або червоним. Супутник, який зміщений у бік коротких хвиль — антистоксовий або фіолетовий.

Співвідношення між енергіями падаючого  $h\nu_0$  і розсіяного фотонів для випадків стокового  $h\nu_{\text{ст}}$  і антистоксового  $h\nu_{\text{ант}}$  комбінаційного розсіяння світла мають вигляд:

$$h\nu_{\text{ст}} = h\nu_0 - h\nu_k,$$

$$h\nu_{\text{ант}} = h\nu_0 + h\nu_k.$$

де  $h\nu_k$  — енергія переходу з основного стану в збуджений коливальний ( $n = 1$ ) або обертальний ( $r = 1$ ) стан молекули.

3.4.3. Люмінесценція — це випромінювання, надлишкове над тепловим випромінюванням тіла при даній температурі, яке має тривалість більшу за період світлових хвиль.

Дж. Стокс встановив, що довжина хвилі люмінесцентного випромінювання більша довжини хвилі того випромінювання, яке збуджує свічення:

(закон Стокса).

Характеристиками люмінесценції є енергетичний та квантовий виходи.

Енергетичний вихід  $\eta$  – відношення енергії люмінесценції до енергії поглинутого люмінофором світла.

Квантовий вихід  $\theta$  – відношення числа квантів люмінесценції до числа поглинутих квантів.

Між енергетичним і квантовим виходами існує зв'язок :

3.4.4. Якщо молекули, атоми, іони мають парамагнітні властивості, то вони здатні до резонансного поглинання енергії радіочастотного діапазону. Необхідною умовою такого поглинання є накладання постійного магнітного поля, індукція якого  $B$ .

Частота змінного магнітного поля  $\omega$ , при якій відбувається таке поглинання, визначається співвідношенням:

$$\omega = g \frac{e}{2m} \cdot B$$

Поглинута при цьому енергія становить:

$$h\nu = \frac{e\hbar}{2m} g B$$

де  $e$  – заряд парамагнітної частинки,  $m$  – маса частинки,  $g$  – множник Ланде.  
Для електрона  $g = 2,0023$ .

### 3.5. Квантові властивості речовин.

#### 3.5.1. Спонтанне та індуковане випромінювання

3.5.2.1. Імовірність переходів квантової системи за одиницю часу між рівнем 1 та вищим рівнем 2 для спонтанного випромінювання:



а для вимушеного випромінювання та поглинання відповідно:

$$(\omega, T)$$

$$(\omega, T)$$

де  $A_{21}, B_{11}, B_{12}$  — коефіцієнти Ейнштейна;  $U(\omega, T)$  — спектральна густина енергії випромінювання;  $\omega_{21} = \omega_{12}$  — частоти переходу між рівнями.

Зв'язок між коефіцієнтами Ейнштейна:

де  $g_1, g_2$  — кратність виродження відповідних рівнів.

Середній час життя у збудженому стані  $\tau = \frac{1}{W}$ .

Відношення заселеностей енергетичних рівнів:

$n_1(E)$  і  $n_2(E)$  — заселеності відповідних рівнів.

Зв'язок між довжиною хвилі лазерного випромінювання і довжиною оптичного резонатора:

$$L = m \frac{\lambda}{2} \quad (m - \text{ціле число})$$

### 3.5.2. Надпровідність

3.5.2.1. Надпровідність — зникнення у деяких речовин (надпровідниках) електричного опору при охолодженні їх до певної критичної температури  $T_k$ . Експериментальним шляхом встановлено, що для критичної температури кристалічних ґраток різних ізотопів одного і того ж хімічного елемента виконується співвідношення (ізотопічний ефект):

$$T_k M^{\frac{1}{2}} = c = \text{const.}$$

де  $M$  — молярна маса речовини,  $c$  — стала для всіх ізотопів даного хімічного елемента.

#### 4. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

4.1. Максимум спектральної випромінювальної здатності залізної кулі діаметром  $D = 10 \text{ см}$ , яка вважається абсолютно чорним тілом, припадає на довжину хвилі  $\lambda_{\text{max}} = 1,6 \text{ мкм}$ . Визначити температуру  $T$  тіла через  $t = 2 \text{ с}$  з початку охолодження.

Дано:

$$D = 10 \text{ см}$$

$$\lambda_{\text{max}} = 1,6 \text{ мкм}$$

$$t = 2 \text{ с}$$

$$\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$c = 0,46 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$T_x = ?$$

СІ

$$0,1 \text{ м}$$

$$1,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Аналіз

Кількість теплоти, яку віддає куля при

зниженні її температури на  $dT$ :

$$dQ = -cm \, dT,$$

де  $c$  — питома теплоємність заліза,

$$m = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho$$

— маса

кулі,

$\rho$  — густина заліза.

З іншої сторони: де  $S$  — поверхня кулі.

$$\text{Тоді} \quad -\frac{1}{6} \pi D^3 \rho dT = \sigma T^4 \pi D^2 \cdot dt$$

$$\text{Звідки} \quad dt = -\frac{c \cdot D \cdot \rho}{6\sigma} \cdot \frac{dT}{T^4}$$

Після інтегрування у межах від  $T_x$  до  $T_0$  ( $T_0$  — початкова температура кулі) одержимо:

$$t = -\frac{c \cdot D \cdot \rho}{6\sigma \left( \frac{-1}{3T_x^3} \middle| \frac{1}{T_0} \right)} = \frac{c \cdot D \cdot \rho}{18\sigma} \left( \frac{1}{T_x^3} - \frac{1}{T_0^3} \right)$$

де  $T_0 = \frac{b}{\lambda_{\max}}$  – початкова температура кулі.

$$T_x = \frac{1}{\sqrt[3]{18 \frac{c}{\sigma} \cdot D \cdot \rho + \left( \frac{\lambda_{\max}}{b} \right)^3}}$$

Отже,

Обрахунки:

$$T_x = \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{18 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 2}{0,46 \cdot 10^3 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 0,1} + \left( \frac{1,6 \cdot 10^{-6}}{2,89 \cdot 10^{-3}} \right)^3}} = 1790 \text{ K.}$$

Відповідь: температура кулі знизилась до 1790 K.

4.2. Визначити довжину хвилі  $\lambda_{\max}$ , яка відповідає максимуму спектральної випромінювальної здатності волоска лампи розжарювання, площа

**см<sup>2</sup>**

поверхні якого 0,25 . Потужність, яка споживається лампою,  $P = 25 \text{ Вт}$ . Вважати, що волосок лампи є сірим тілом, поглинальна здатність якого  $a = 0,3$ ; внаслідок теплопровідності іншим тілам передається частка  $\eta = 0,2$  від енергії, яка споживається лампою.

Дано:

$$S = 0,25 \text{ см}^2$$

$$P = 25 \text{ Вт}$$

$$a = 0,3$$

$$\eta = 0,2$$

$$\lambda_{\max} - ?$$

СІ

$$0,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Аналіз

Шукана довжина хвилі входить у закон зміщення Віна:

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

$$\text{де } b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Абсолютну

температуру

знаходимо із закону Стефана-Больцмана для сірих тіл  $E(T) = \sigma a T^4$ ,

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

Повна випромінювальна здатність тіла визначається через енергію, яку воно випромінює:

$$E(T) = \frac{W}{St} = \frac{P}{S}.$$

За умовою задачі частина енергії  $\eta$  витрачається на нагрівання інших тіл, на випромінювання залишається  $(1 - \eta)P$  потужності. Тоді

$$\frac{(1 - \eta)P}{S} = \sigma a T^4,$$

$$\text{звідки } T = \sqrt[4]{\frac{(1 - \eta)P}{\sigma a S}},$$

а шукана довжина хвилі

$$\lambda_{\max} = b \sqrt[4]{\frac{\sigma a S}{(1 - \eta)P}}.$$

Обрахунки:

$$\lambda_{\max} = 2,89 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,3 \cdot 0,25 \cdot 10^{-4}}{(1 - 0,2) \cdot 25}} = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Відповідь: довжина хвилі, яка відповідає максимуму спектральної випромінювальної здатності волоска лампи розжарювання становить  $1,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

**4.3.** Фотоелектрони, що вириваються з поверхні металу, повністю затримуються прикладеною зворотною напругою  $U_0 = 3\text{В}$ . Фотоефект для цього металу починається при частоті падаючого монохроматичного світла  $\nu_0 = 6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ .

Визначити: 1) роботу виходу електронів з цього металу;

2) частоту випромінювання.

Дано:

$$U_0 = 3\text{В}$$

$$\nu_0 = 6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$$

$A - ?$   
 $\nu - ?$

Аналіз

Шукана робота виходу є одним із доданків рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекта, який спостерігається саме на металах:

$$h\nu = A + \frac{m\nu^2}{2},$$

де  $\nu$  – частота спрямованого на метал світла;  $m$  і  $\nu$  – відповідно маса і швидкість фотоелектрона. Значення  $A$  визначається за червоною межею фотоефекта:

$$A = h\nu_0.$$

Швидкість вилітаючих з поверхні металу фотоелектронів можна загальмувати до нульового значення зворотною напругою:

$$\frac{m\nu^2}{2} = eU_0.$$

Тоді рівняння Ейнштейна набуде вигляду:

$$h\nu = h\nu_0 - eU_0.$$

Звідки

$$\nu = \nu_0 + \frac{eU_0}{h}.$$

Обрахунки:

$$A = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14} = 39,72 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = 2,48 \text{ eV}.$$

$$\nu = 6 \cdot 10^{14} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3}{6,62 \cdot 10^{-34}} = 1,32 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

Відповідь: робота виходу електронів з металу становить 2,48 eV; частота випромінювання, яке спричиняє фотоефект,  $1,32 \cdot 10^{15}$  Гц.

#### 4.4. Ізольована металева пластинка освітлюється з довжиною хвилі 400 нм.

Робота виходу електронів з такого металу 2 eV. До якого потенціалу зарядиться пластинка при постійній дії світла?

Дано:

$$\lambda = 400$$

нм

$$A = 2 \text{ eV}$$

$U - ?$

СІ

$$400 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Аналіз

Для явища зовнішнього фотоефекту маємо:

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

де  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  — частота світла, що потрапляє на частинку,

$m$  — маса електрона,  $v$  — його швидкість.

Потенціал, до якого зарядиться пластинка, за величиною дорівнює

затримуючому потенціалу, тобто,  $eU = \frac{mv^2}{2}$ . Тоді

$$h \frac{c}{\lambda} = A + eU,$$

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

Звідки

Обрахунки:

$$U = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^{-9}} - 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,1 \text{ В.}$$

Відповідь: пластинка зарядиться до 1,1 В.

4.5. Короткохвильова межа суцільного рентгенівського спектра у випадку, коли до рентгенівської трубки прикладена різниця потенціалів 40 кВ, дорівнює  $3,1 \cdot 10^{-11}$  м. За цими даними визначити сталу Планка.

Дано:

$$\lambda_{\min} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

$$U = 40 \text{ кВ}$$

Розв'язок:

Сі

$$40 \cdot 10^3 \text{ В}$$

Аналіз

Закон збереження енергії при утворенні рентгенівського проміння має вигляд:

$$\frac{mv^2}{2} = Q + h\nu,$$

де  $\frac{mv^2}{2}$  — кінетична енергія налітаючого на антикатод електрона. Ця енергія частково витрачається на нагрівання

антикатада Q, а решта на випромінювання  $h\nu = h \frac{c}{\lambda}$ .

$\lambda$  буде мінімальною, коли  $\nu$  стає максимальною, тобто, коли Q=0.

Тоді

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu_{\max} = h \frac{c}{\lambda_{\min}}.$$

Кінетичну енергію електрон набуває за рахунок прискорюючої різниці потенціалів між катодом та антикатодом. Тобто

$$\frac{mv^2}{2} = eU.$$

Отже, 
$$eU = h \frac{c}{\lambda_{\min}}$$

Звідки

$$h = \frac{eU \cdot \lambda_{\min}}{c}.$$

Обрахунки :

$$h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 3,1 \cdot 10^{-11}}{3 \cdot 10^8} = 6,61 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

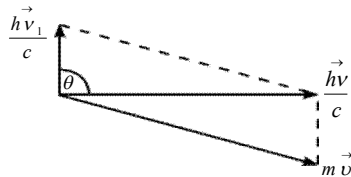
Відповідь: одержане значення для сталої Планка  $6,61 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

**4.6.** Фотон з довжиною хвилі  $\lambda = 5 \text{ нм}$  зазнав комптонівського розсіювання під кутом  $\theta = 90^\circ$  на електроні, що перебував у стані спокою. Визначити: 1) зміну довжини хвилі при розсіянні; 2) енергію електрона віддачі; 3) імпульс електрона віддачі.

Дано:	СІ
$\lambda = 5 \text{ нм}$	$5 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
$\theta = 90^\circ$	
$\Delta\lambda - ?$	
$E - ?$	
$T - ?$	
$p - ?$	

Аналіз

Схема комптонівського розсіювання, відповідно до умови задачі, має вигляд:



Запишемо закони збереження енергії та імпульсу:

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu_1 + mc^2; \quad (1)$$

$$\frac{h\nu}{c} = m\nu + \frac{h\nu_1}{c}, \quad (2)$$

де  $h\nu$  і  $\frac{h\nu}{c}$  – енергія і імпульс рентгенівського фотона до зіткнення з електроном;  $h\nu_1$  і  $\frac{h\nu_1}{c}$  – відповідно після зіткнення;  $m_0$  – маса спокою електрона;  $m$  і  $v$  – маса і швидкість електрона після зіткнення.

Із рівнянь (1) і (2) маємо:

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda = 2\Lambda \sin^2 \frac{\theta}{2}, \text{ де } \Lambda = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Повну енергію електрона віддачі знаходимо з (1):

$$E = mc^2 = h(\nu - \nu_1) + m_0c^2$$

або через довжини хвиль:

$$E = hc\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_1}\right) + m_0c^2.$$

Кінетична енергія електрона віддачі дорівнює різниці повної і потенціальної енергії:

$$T = E - m_0c^2.$$

Враховуючи, що  $\theta = 90^\circ$ , із рівняння (2) знаходимо:

$$p^2 = (mv)^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda_1}\right)^2 = h^2 \left[ \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_1}\right)^2 \right];$$

$$p = h \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_1}\right)^2}.$$

Обрахунки:

$$\Delta\lambda = 2 \cdot 2,43 \cdot 10^{-12} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 2,43 \text{ нм};$$

$$\lambda_1 = (5 + 2,43) \cdot 10^{-12} = 7,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 7,43 \text{ нм};$$

$$E = 6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{12} \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{7,43}\right) + 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16} =$$

$$= 1,31 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} + 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} =$$

$$= 0,81 \cdot 10^5 \text{ eB} + 5,12 \cdot 10^5 \text{ eB} = 5,93 \cdot 10^5 \text{ eB} = 593 \text{ KeB};$$

$$T = 593 - 512 = 81 \text{ KeB};$$



$$p = \frac{6,625 \cdot 10^{-34}}{10^{-12}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{7,43}\right)^2} = 1,6 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

Відповідь: зміна довжини хвилі становить  $2,43 \text{ нм}$ , повна енергія електрона віддачі  $593 \text{ Кев}$ , його кінетична енергія  $81 \text{ Кев}$ ; імпульс електрона віддачі  $1,6 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .

4.7. Визначити сталу екранування для вольфраму, якщо перехід електрона в атомі вольфраму з М-шару на L-шар породжує рентгенівські промені, довжина хвилі яких  $1,43 \text{ \AA}$ .

Дано:	СІ	Аналіз
$\lambda = 1,43 \text{ \AA}$		Згідно формули Мозлі
$n = 2$		де $Z$ — порядковий номер хімічного
$m = 3$		елемента у таблиці Менделєєва,
$\alpha = ?$		$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ — стала
		Рідберга, $\alpha$ — стала екранування.

З цієї формули:

$$[(Z - \alpha)]^2 = \frac{1}{\lambda R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)}$$

Звідки

$$\alpha = Z - \frac{1}{\sqrt{\lambda R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)}}$$

Для вольфраму  $Z=74$ ; М-шару відповідає квантове число 3 ( $m=3$ ), а L-шару – число 2 ( $n=2$ ).

Обрахунки :

$$\alpha = 74 - \frac{1}{\sqrt{1,43 \cdot 10^{-10} \cdot 1,097 \cdot 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9}\right)}} = 6,3$$

Відповідь: стала екранування для вольфраму рівна  $6,3$ .

4.8. Знайти діаметр сферичної космічної частинки із заліза, якщо сили світлового тиску і тяжіння Сонця, що діють на неї, взаємно зрівноважуються.

Сонце вважати абсолютно чорним тілом, яке знаходиться при температурі 6000 K, а частинку чорною.

Дано:	СІ	Аналіз
$T = 6000 \text{ K}$		За умовою задачі сила тяжіння і сила світлового тиску зрівноважені:
$R_c = 6,95 \cdot 10^8 \text{ км}$	$6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$	$G \frac{m \cdot M_c}{R^2} = p \cdot S,$
$\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$		де $m$ - маса частинки, $R$ - відстань від центра Сонця до частинки, $S$ - площа проекції частинки на площину,
$d = ?$		$p$ - світловий тиск. Для сфери $m = \rho \frac{\pi d^3}{6}$ і $S = \frac{\pi d^2}{4}$ . Для чорної частинки $p = \frac{I}{c}$

( $I$  — інтенсивність сонячного випромінювання, яке падає на частинку).

На поверхні Сонця  $I_0 = \sigma T^4$ . За одну секунду поверхня Сонця  $S_c$  випромінює енергію  $W = \sigma T^4 \cdot S_c = \sigma T^4 \cdot 4\pi R_c^2$ .

Інтенсивність випромінювання на відстані  $R$  від Сонця (там, де знаходиться частинка):

$$I = \frac{W}{4\pi R^2} = \frac{\sigma T^4 \cdot 4\pi R_c^2}{4\pi R^2} = \sigma T^4 \cdot \frac{R_c^2}{R^2}$$

Тоді сила сонячного тиску буде:

$$\frac{\sigma T^4}{c} \cdot \frac{R_c^2}{R^2} \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

Ця сила зрівноважується гравітаційною силою:

$$G \frac{M_c}{R^2} \cdot \rho \pi \frac{d^3}{6}$$

Отже,

$$\frac{\sigma T^4}{c} \cdot \frac{R_c^2}{R^2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = G \frac{M_c}{R^2} \cdot \rho \pi \frac{d^3}{6}$$

Звідки

$$d = \frac{3 \sigma T^4 \cdot R_c^2}{2 c G \rho M_c}$$

Обрахунки :

$$d = \frac{3 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (6000)^4 \cdot (6,95)^2 \cdot 10^{16}}{2 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 1,97 \cdot 10^{30}} = 1,73 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Відповідь: діаметр космічної частинки становить  $1,73 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ .

**4.9.** Визначити частоту світла, що випромінює атом водню, при переході електрона на рівень з головним квантовим числом  $n = 2$ , якщо радіус орбіти електрона змінився у дев'ять разів.

Дано:

$$n = 2$$

$$\frac{r_m}{r_n} = 9$$

$$\frac{r_m}{r_n}$$

$$\nu = ?$$

Аналіз

Із теорії Бора для атома водню слідує:

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi \cdot e^2 \cdot m_e} \cdot n^2. \text{ Тоді } \frac{r_m}{r_n} = \frac{m^2}{n^2} = 9; \quad \frac{m}{n} = 3.$$

Оскільки  $n = 2$ , то  $m = 6$ .

Таким чином, електрон в атомі водню перейшов зі стану, який характеризується квантовим числом 6, у стан з квантовим числом 2. Частота світла, яке при такому переході випромінюється, визначається виразом:

$$\nu = R \cdot c \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \text{ де } R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}.$$

Обрахунки:

$$\nu = 1,097 \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot 10^8 \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{6^2} \right) = 7,31 \cdot 10^{14} \text{ Гц}.$$

Відповідь: фотон, який випромінює атом водню, має частоту  $7,31 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ .

**4.10.** Знайти енергію фотона, що відповідає третій лінії серії Бальмера спектра водню.

Дано:

$n = 2$  (серія Бальмера)

$m = 5$  (третя лінія

серії Бальмера)

**E-7**

Аналіз

Довжинахвиль спектральних ліній водню всіх серій визначаються формулою:

де  $R = 1,097 \cdot 10^7$  – стала Рідберга;  $n, m$  – номери орбіт. Для серії Бальмера  $n = 2$ , а третя лінія виникає, коли електрон переходить на цей

енергетичний рівень із рівня  $m = 5$ .

Домножимо останнє рівняння на  $hc$ :

$$\frac{c\hbar}{\lambda} = c\hbar R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ або } h\nu = c\hbar R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Тобто

$$E = c\hbar R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Обрахунки :

$$E = 3 \cdot 10^8 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 1,097 \cdot 10^7 \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{25} \right) = 4,58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Відповідь: енергія фотона, що випромінюється атомом водню при переході у ньому електрона з п'ятого енергетичного рівня на другий становить  $4,58 \cdot 10^{-19}$  Дж або 2,86 eV.

4.11. Знайти радіус другої борівської орбіти в атомі водню і швидкість електрона на ній.

Дано:

$$n = 2$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$r_2 = ?$$

$$v_2 = ?$$

Аналіз

З боку ядра на електрон діє кулонівська сила притягання  $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}$ . Вважається, що електрон обертається навколо ядра зі швидкістю  $v_2$ . Тоді, на основі другого закону Ньютона, можна записати

**трона на ній.** (1)

На основі постулата Бора:

$$m_e v_2 r_2 = n \frac{h}{2\pi} \quad (2)$$

Розв'язавши систему рівнянь (1) і (2), знаходимо:

$$r_2 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi e^2 m_e} n^2; v_2 = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n};$$

Обрахунки:

$$r_2 = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (6,63 \cdot 10^{-34})^2}{3,14 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot 4 = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ м;}$$

$$v_2 = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34}} \cdot \frac{1}{2} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

Відповідь: радіус другої орбіти електрона в атомі водню становить  $2,1 \cdot 10^{-10}$  м а швидкість електрона на цій орбіті  $1,1 \cdot 10^6$  м/с.

4.12. Довести, що рівняння плоскої хвилі  $\Psi(\vec{r}, t) = A e^{-i(\omega t - \vec{k}\vec{r})}$  є розв'язком рівняння Шредінгера для вільної частинки.

Дано:	Аналіз
$\Psi = A e^{-i(\omega t - \vec{k}\vec{r})}$ $V = 0$	Рівняння Шредінгера для вільної частинки ( $V = 0$ ) набуває вигляду:
$\Psi$ задовольняє	
р-ня Шредінгера?	Із виразу для плоскої хвилі знайдемо: $\frac{\partial \Psi}{\partial t} = A(-i\omega) e^{-i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} = -i\omega \Psi;$ $\nabla \Psi = A i \vec{k} e^{-i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} = i \vec{k} \Psi;$ $\Delta \Psi = \nabla^2 \Psi = A i \vec{k} \cdot i \vec{k} e^{-i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} = -k^2 \Psi.$

Тоді

$$i\hbar \cdot (-i\omega)\Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \cdot (-k^2)\Psi.$$

Звідки

або

Маючи на увазі, що  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $\lambda = \frac{h}{mv}$   
і , одержуємо:

Відповідь: дійсно, рівняння плоскої хвилі вільної частинки може бути одним із розв'язків рівняння Шредінгера.

4.13. Система складається з двох електронів, орбітальні квантові числа яких  $l_1 = 1$  та  $l_2 = 2$ . Встановити можливі значення орбітального  $l$  та магнітного  $m$  квантових чисел системи частинок.

Дано:	Аналіз
$l_1 = 1$ $l_2 = 2$	Для системи частинок квантовий закон додавання моментів записується у вигляді: $l = l_1 + l_2, \quad l_1 + l_2 - 1, \quad \dots, l_1 - l_2;$
$l = ?$	$m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots$
$m = ?$	де $l_1$ і $l_2$ – числа, які визначають модулі моментів, що додаються. Тоді для орбітального квантового числа можливі варіанти: $l = l_1 + l_2 = 3; \quad l = l_1 + l_2 - 1 = 2; \quad l = l_1 + l_2 - 2 = 1$ .

Для магнітного квантового числа відповідно ( $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm l$ ):

$$m = -l_{\max} = -3; \quad m = -l_{\max} + 1 = -2; \quad m = -l_{\max} + 2 = -1;$$

$$m = -l_{\max} + 3 = 0;$$

$$m = l_{\max} - 1 = 2; \quad m = l_{\max} - 2 = 1; \quad m = l_{\max} - 3 = 0.$$

Відповідь: для системи з двох електронів можливих значень орбітального квантового числа три, магнітного – сім.

Дано:
$U = 100V$
$m_p = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
$q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

4.14. Визначити довжину хвилі де Бройля для протонів, які прискорені різницею потенціалів 100В.

Аналіз

Довжина хвилі де Бройля визначається співвідношенням: **трона на ній.**

Під впливом різниці потенціалів протон набуває швидкості, яку можна визначити з рівняння:

$$q_p U = \frac{m_p v^2}{2}$$

Звідки 
$$v = \sqrt{\frac{2q_p U}{m_p}}$$

Тоді

$$\lambda = \frac{h}{m_p \sqrt{\frac{2q_p U}{m_p}}} = \frac{h}{\sqrt{2q_p m_p U}}$$

Обрахунки:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 100}} = 2,87 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Відповідь: довжина хвилі де Бройля для протона становить **2,87 · 10<sup>-12</sup> м.**

4.15. Електрон, кінетична енергія якого  $T = 4 \text{ eV}$ , локалізований в області розміром  $l = 1 \text{ мкм}$ . Оцінити за допомогою співвідношення невизначеностей відносну невизначеність його швидкості.

Дано:	СІ
$T = 4 \text{ eV}$	$4,1,6 \cdot 10^{-9} \text{ Дж}$

$$l = 1 \text{ мкм} \quad 10^{-6} \text{ м}$$

Аналіз

Співвідношення невизначеностей для координати та імпульсу:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$$

За умовою задачі  $\Delta x = l$ . Оскільки, при заданій енергії електрон не релятивістський, то

$$\Delta p_x = m \Delta v_x$$

Швидкість електрона визначимо через його енергію:

$$T = \frac{mv^2}{2}, \text{ звідки } v = \sqrt{\frac{2T}{m}}$$

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta p_x}{m} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{2T}{m}}} = \frac{\hbar}{l\sqrt{2Tm}}$$

Тоді

Обрахунки:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1,055 \cdot 10^{-34}}{10^{-6} \cdot \sqrt{2 \cdot 4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}} = 9,77 \cdot 10^{-5} \approx 10^{-4}$$

Відповідь: відносна невизначеність швидкості електрона становить  $10^{-4}$ .

**4.16.** Визначити момент інерції молекули  $\text{CO}$  та оцінити її розміри, якщо для обертового переходу зі стану  $r_1 = 0$  у стан  $r_2 = 1$  у спектрі поглинання з'явиться лінія  $\nu = 1,153 \cdot 10^{11}$  Гц. Молекулу вважати жорсткою.

Дано:

$\text{CO}$

$$\nu = 1,153 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$$

$l = ?$

$r = ?$

Аналіз

Енергія обертового руху двохатомної молекули:

$$E(r+1),$$

де  $I\omega$  момент інерції молекули відносно осі, що проходить через її центр інерції;  $r$  — квантове число молекули, яке може набувати значень  $0, 1, 2, \dots$

При переході молекули із нижнього стану  $E_1$  у вищий стан  $E_2$  молекула поглинає енергію  $E$ :



$$\cdot r_2(r_2+1) \cdot r_1(r_1+1).$$

За умовою задачі  $E = h\nu$ ;  $r_1 = 0$ ;  $r_2 = 1$ . Тоді

$$\cdot 1(1+1) \quad \cdot 0(0+1)=$$

Звідки

Момент інерції молекули  $CO$  визначається виразом:

$$I = mr^2,$$

де  $r$  можна вважати радіусом молекули, а  $m = \frac{m_o \cdot m_c}{m_o + m_c}$  ( $m_o$  і  $m_c$  — маси атомів  $O$  і  $C$  відповідно).

$$r = \sqrt{\frac{I(m_o + m_c)}{m_o \cdot m_c}}$$

Тоді

Обрахунки:

$$I = \frac{1,055 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,153 \cdot 10^{-11}} = 1,46 \cdot 10^{-46} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$r = \sqrt{\frac{1,46 \cdot 10^{-46} \cdot 28 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}}{16 \cdot 12 \cdot (1,66 \cdot 10^{-27})^2}} = 1,13 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Відповідь: момент інерції молекули  $CO$  становить  $1,46 \cdot 10^{-46} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  її радіус має порядок  $10^{-10} \text{ м}$ .

**4.17.** Електрон знаходиться у постійному магнітному полі, індукція якого  $B = 1,5 \text{ Тл}$ . Визначити при якій частоті  $\omega$  змінного поля відбудеться резонансне поглинання електроном енергії.

Дано:

$$B = 1,5 \text{ Тл}$$

$\omega = ?$

Аналіз

Явище резонансного поглинання парамагнітної речовиною, яка поміщена у достатньо сильне постійне магнітне поле, енергії високочастотного поля одержало назву електронного парамагнітного резонансу (ЕПР).

Для спостереження ЕПР необхідно, щоб частота змінного електромагнітного

поля становила: 
$$\omega = g \frac{e}{2m} B.$$

де  $e$  і  $m$  — заряд і маса електрона,  $g$  — множник Ланде частинки. Для електрона  $g = 2,0023 \approx 2$ .

Обрахунки:

$$\omega = 2 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot 1,5 = 2,64 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$$

Відповідь: частота змінного поля повинна становити  $2,64 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ .

Це міліметровий діапазон радіохвиль.

**4.18.** Газоподібний літій, що містить  $N = 3,0 \cdot 10^{16}$  атомів, має температуру  $T = 1500 \text{ К}$ . Середній час життя атома літію у збудженому стані  $\tau = 0,07 \text{ мкс}$ . Перехід атома літію із стану  $2p$  у стан  $2s$  супроводжується випромінюванням лінії  $\lambda = 670,8 \text{ нм}$ . Визначити потужність випромінювання цієї лінії.

Дано:

$$T = 1500 \text{ К}$$

$$\tau = 0,07 \text{ мкс}$$

$$N = 3,0 \cdot 10^{16}$$

$$\lambda = 670,8 \text{ нм}$$

$$\tau = 0,07 \text{ мкс}$$

$$2p \rightarrow 2s$$

СІ

$$0,07 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$670,8 \cdot 10^{-9}$$

м

## Аналіз

Не всі  $N$  атомів літію знаходяться у збудженому стані 2р.

Відношення заселеності енергетичних рівнів:

$P - ?$

де  $g_1$  і  $g_2$  — кратність вираження відповідних рівнів:  $g_1 = 6$ ,  $g_2 = 2$ . Тоді кількість збуджених атомів:

Кожен з цих атомів випромінює фотон з енергією  $h \frac{c}{\lambda}$ . Загальна енергія становитиме  $N_2 \cdot h \frac{c}{\lambda}$ , а потужність випромінювання  $P$  буде:

Оцінимо значення  $N_2$  — кількості атомів у не збудженому стані. Для цього порівняємо енергію одного фотона  $h \frac{c}{\lambda}$  з енергією збуджуючого випромінювання фактора —  $kT$ :

$$\begin{aligned} h \frac{c}{\lambda} &= 6,63 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{670,8 \cdot 10^{-9}} = 2,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж;} \\ kT &= 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1500 = 2,07 \cdot 10^{-20} \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Тобто,  $h \frac{c}{\lambda} \gg kT$ . Це означає, що при заданій температурі лише незначна кількість атомів знаходиться у збудженому стані. Для оцінки потужності випромінювання можна прийняти, що  $N_2 = N$ . Крім того, слід врахувати, що

$$E_2 - E_1 = h\nu = h \frac{c}{\lambda}. \text{ Тоді,}$$

$$P = N \frac{g_2}{g_1} \cdot \frac{hc}{\lambda\tau} \cdot e^{-\frac{hc}{\lambda kT}}.$$

Обрахунки:

$$P = 3 \cdot 10^{16} \cdot \frac{2}{6} \cdot \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{670,8 \cdot 10^{-9} \cdot 0,07 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{-\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{670,8 \cdot 10^{-9} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1500}} = 0,234 \text{ Вт}$$

Відповідь: потужність випромінювання газоподібного літію становить: 234 мВт

4.19. Визначити різницю частот  $\Delta\nu$  між сусідніми власними частотами резонатора у гелієво-неоновому лазері з довжиною резонатора  $L = 1\text{ м}$  та порівняти її з природною шириною спектральної лінії  $\Delta\nu_{\text{пр}}$ .

Дано:

$$L = 1 \text{ м}$$

$\Delta\nu = ?$

Аналіз

Між довжиною оптичного резонатора і довжиною хвилі, яку цей лазер випромінює, існує наступний зв'язок:

$$L = m \frac{\lambda}{2},$$

$$\lambda = \frac{2L}{m}$$

де  $m$  — ціле число. З останнього виразу

$$\text{або } \nu = \frac{cm}{2L}.$$

Визначимо частоти двох сусідніх ліній, для яких  $m$  відрізняється на одиницю:

$$\nu_1 = \frac{c}{2L} \cdot m; \quad \nu_2 = \frac{c}{2L} \cdot (m + 1).$$

Різниця цих частот

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = \frac{c}{2L}.$$

Природна ширина спектральної лінії визначається із співвідношення  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ , або  $h \cdot \Delta\nu_{\text{пр}} \cdot \Delta t \geq \hbar$ .

$$\text{Звідки } \Delta\nu \geq \frac{1}{2\pi \cdot \Delta t}.$$

Обрахунки:

$$\Delta\nu = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$$

$$\Delta\nu_{\text{пр}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-8}} = 1,59 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$$

Відповідь:  $\Delta\nu$  на порядок більша  $\Delta\nu_{\text{пр}}$ .

4.20. Нуклід  ${}^{64}_{30}\text{Zn}$  переходить у надпровідний стан при температурі  $T_1 = 0,88 \text{ K}$ . При якій температурі  $T_2$  відбувається перехід у надпровідний стан

нукліда  ${}^{63}_{30}\text{Zn}$  ?

Дано:

$$T_1 = 0,88 \text{ K}$$



$T_2 = ?$

Аналіз

Перехід у надпровідний стан ізотопів одного і того ж хімічного елемента визначається виразом:

$$T_K \sqrt{M} = c,$$

де  $M$  — молярна маса ізотопу, а  $c$  — стала для всіх ізотопів даного хімічного елемента. На цій основі можемо записати :

$$T_1 \sqrt{M_1} = T_2 \sqrt{M_2}.$$

Звідки 
$$T_2 = T_1 \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}.$$

Обрахунки:

$$T_2 = 0,88 \sqrt{\frac{64}{63}} = 0,89 \text{ K}.$$

Відповідь: ізотоп  ${}^{63}_{30}\text{Zn}$  переходить у надпровідний стан при температурі  $0,89 \text{ K}$ .

## 5. РОЗПОДІЛ ЗАДАЧ ЗА ВАРІАНТАМИ

Варіанти	Номери задач						
I							
<b>1</b>	1	41	81	121	161	201	241
<b>2</b>	2	42	82	122	162	202	242
<b>3</b>	3	43	83	123	163	203	243
<b>4</b>	4	44	84	124	164	204	244
<b>5</b>	5	45	85	125	165	205	245
<b>6</b>	6	46	86	126	166	206	246
<b>7</b>	7	47	87	127	167	207	247
<b>8</b>	8	48	88	128	168	208	248
<b>9</b>	9	49	89	129	169	209	249
<b>10</b>	10	50	90	130	170	210	250
<b>11</b>	11	51	91	131	171	211	251
<b>12</b>	12	52	92	132	172	212	252
<b>13</b>	13	53	93	133	173	213	253
<b>14</b>	14	54	94	134	174	214	254
<b>15</b>	15	55	95	135	175	215	255
<b>16</b>	16	56	96	136	176	216	256
<b>17</b>	17	57	97	137	177	217	257
<b>18</b>	18	58	98	138	178	218	258
<b>19</b>	19	59	99	139	179	219	259

<b>20</b>	20	60	100	140	180	220	260
-----------	----	----	-----	-----	-----	-----	-----

Варіанти	Номери задач						
<b>II</b>							
<b>21</b>	21	61	101	141	181	221	261
<b>22</b>	22	62	102	142	182	222	262
<b>23</b>	23	63	103	143	183	223	263
<b>24</b>	24	64	104	144	184	224	264
<b>25</b>	25	65	105	145	185	225	265
<b>26</b>	26	66	106	146	186	226	266
<b>27</b>	27	67	107	147	187	227	267
<b>28</b>	28	68	108	148	188	228	268
<b>29</b>	29	69	109	149	189	229	269
<b>30</b>	30	70	110	150	190	230	270
<b>31</b>	31	71	111	151	191	231	271
<b>32</b>	32	72	112	152	192	232	272
<b>33</b>	33	73	113	153	193	233	273
<b>34</b>	34	74	114	154	194	234	274
<b>35</b>	35	75	115	155	195	235	275
<b>36</b>	36	76	116	156	196	236	276
<b>37</b>	37	77	117	157	197	237	277
<b>38</b>	38	78	118	158	198	238	278
<b>39</b>	39	79	119	159	199	239	279

40	40	80	120	160	200	240	280
----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----

## 6. ЗАДАЧІ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Тіло має червоний колір. Чи поглинає таке тіло світлові хвилі, які відповідають червоному кольору? Яким кольором світлитиметься це тіло у розжареному стані?
2. З віконця печі площею випускається випромінювання потужністю  $P = 20 \text{ Вт}$ . Яка температура печі, якщо вважати її абсолютно чорним тілом?
3. Яку потужність випромінює отвір у печі площею? Піч вважати абсолютно чорним тілом, що знаходиться при температурі  $820 \text{ К}$ .
4. Нагріта куля радіусом  $5 \text{ см}$  випускає випромінювання потужністю  $1 \text{ кВт}$ . Вважаючи кулю сірим тілом ( $\kappa=0,25$ ), визначити її температуру.
5. Які розміри нагрітого до  $1200 \text{ К}$  куба, якщо він щосекунди випромінює енергію у  $1000 \text{ Дж}$ ? Куб вважати сірим тілом ( $\kappa=0,3$ ).
6. Яка ступінь сірості тіла, яке з поверхні площею  $100 \text{ см}^2$  при температурі  $2000 \text{ К}$  за час дві хвилини випромінює енергію у  $1,34 \text{ кДж}$ ?
7. Вважаючи, що Земля та Сонце абсолютно чорні тіла, визначити середню температуру Землі. Температуру поверхні Сонця прийняти рівною  $5800 \text{ К}$ .
8. Куля радіусом  $10 \text{ см}$  при температурі  $200 \text{ К}$  випускає випромінювання потужністю  $10 \text{ Вт}$ . Чи є ця куля абсолютно чорним тілом?
9. Вважаючи Сонце абсолютно чорним тілом з максимумом спектральної випромінювальної здатності при  $\lambda_{\text{макс}} = 0,5 \text{ мкм}$ , визначити масу яку віддає Сонце протягом року внаслідок випромінювання.
10. Вважаючи Сонце абсолютно чорним тілом з максимумом спектральної випромінювальної здатності при  $\lambda_{\text{макс}} = 0,5 \text{ мкм}$ , визначити енергетичну світність Сонця.



11. Вважаючи Сонце абсолютно чорним тілом з максимумом спектральної випромінювальної здатності при  $\lambda_{\text{макс}} = 0,5 \text{ мкм}$ , визначити потік енергії, що випромінюється Сонцем.
12. Вважаючи Сонце абсолютно чорним тілом з максимумом спектральної випромінювальної здатності при  $\lambda_{\text{макс}} = 0,5 \text{ мкм}$ , визначити середню інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні Землі.

**м<sup>2</sup>**

13. Обчислити енергію, що випромінюється з 1 поверхні Сонця за 1 хв., прийнявши температуру його поверхні  $5800 \text{ К}$ . Сонце вважати абсолютно чорним тілом.
14. Знайти потужність, що випромінюється абсолютно чорною кулею радіусом  $10 \text{ см}$ , яка знаходиться в кімнаті при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .
15. Температура абсолютно чорного тіла змінюється від  $727 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $1724 \text{ }^\circ\text{C}$ . У скільки разів змінюється при цьому повна кількість випромінюючої тілом енергії?
16. Визначити на яку довжину хвилі припадає максимум спектральної випромінювальної здатності людини, якщо вважати її абсолютно чорним тілом. До якого діапазону хвиль належить таке випромінювання?
17. В якій області спектра знаходиться довжина хвилі, що відповідає максимуму випромінювання Сонця, якщо його вважати абсолютно чорним тілом при температурі  $5800 \text{ К}$ ?
18. Температура поверхні зірки  $12000 \text{ К}$ . Чи можна визначити цю температуру за законом Віна, якщо атмосфера Землі поглинає всі промені з довжиною хвилі, меншою  $290 \text{ нм}$ ?
19. Яку максимальну температуру космічного об'єкту можна визначити за законом Віна, знаходячись на Землі, якщо атмосфера поглинає всі промені, довжина яких менша  $290 \text{ нм}$ ?
20. Скільки енергії випромінює абсолютно чорне тіло за  $1 \text{ с}$  з  $1 \text{ см}^2$  світної поверхні, якщо максимум його випромінювальної здатності припадає на  $725 \text{ нм}$ ?

21. У скільки разів збільшується потужність випромінювання абсолютно чорного тіла, якщо максимум енергії в спектрі переміщується від 700 до 600 нм?
22. Земля внаслідок випромінювання у середньому за 1 хвилину втрачає з

$\text{м}^2$

1 поверхні  $5,4 \text{ кДж}$  енергії. При якій температурі абсолютно чорне тіло випромінювало б таку кількість енергії

23. Температура абсолютно чорного тіла 300 К. Яку кількість енергії випромінює таке тіло з одиниці своєї поверхні за 1с?
24. Температура абсолютно чорного тіла  $127^\circ\text{C}$ . Після підвищення температури сумарна потужність випромінювання зросла утричі. На скільки градусів зросла температура?
25. Людина гріє руки біля пічки, температура поверхні якої  $100^\circ\text{C}$ , температура рук  $30^\circ\text{C}$ . У скільки разів більше енергії одержить шматок льоду при температурі  $0^\circ\text{C}$ , який має таку ж поверхню, як і руки і знаходиться на такій же відстані від пічки?
26. Яку енергію випромінює у простір за добу будинок зовнішня поверхня

$\text{м}^2$

якого становить 1000 і температура  $0^\circ\text{C}$ ? Будинок вважати сірим тілом  $\kappa=0,8$ .

27. Нагріте до  $727^\circ\text{C}$  тіло випромінює з  $1\text{ м}^2$  за 1с  $4 \text{ Дж}$  енергії. Визначити коефіцієнт  $\kappa$  "сірості" тіла.
28. Нехтуючи втратами на теплопровідність, визначити потужність електричного струму, необхідну для нагрівання нитки діаметром 1мм і довжиною 20см до температури 2500 К, якщо коефіцієнт сірості 0,5. Вважати, що нитка випромінює як абсолютно чорне тіло і після встановлення рівноваги вся теплота, яка утворюється в нитці, витрачається на випромінювання.

29. Площа поверхні нитки розжарення 25-ватної вакуумної лампи  $0,403 \text{ см}^2$ , температура її розжарення  $2177^\circ\text{C}$ . У скільки разів така лампа випромінює менше енергії, ніж абсолютно чорне тіло такої ж поверхні та температури?

30. Визначити довжину хвилі  $\lambda_{\text{макс}}$ , яка відповідає максимуму спектральної випромінювальної здатності волоска лампи розжарення, площа поверхні якого  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ . Потужність лампи  $25 \text{ Вт}$ . Вважати, що волосок лампи є сірим тілом  $\kappa=0,3$ ; внаслідок теплопровідності іншим тілам передається частка  $\eta = 0,2$  від енергії, яка споживається лампою.

31. Сонячна постійна, тобто кількість променевої енергії, яку посиляє

$\text{м}^2$

Сонце щосекунди на поверхню  $1 \text{ м}^2$  перпендикулярну до сонячних променів і яка знаходиться поблизу Землі за межами її атмосфери,  $C = 1,4$

$\text{кВт/м}^2$

$\text{кВт/м}^2$ . Вважаючи Сонце абсолютно чорним тілом, визначити його температуру.

32. Абсолютно чорна пластинка, яка знаходиться поблизу Землі за межами її атмосфери, освітлюється сонячними променями, які падають на неї перпендикулярно. Визначити усталену температуру пластинки, якщо

$\text{м}^2$

сонячна постійна (див. попередню задачу) становить  $1,4 \text{ кВт/м}^2$ .

33. Визначити масу, яку втрачає Сонце за  $1 \text{ с}$  за рахунок випромінювання, якщо температура його поверхні  $5800 \text{ К}$ .

34. При спалюванні у вакуумі тонкої вольфрамової нитки сильним електричним струмом на певну мить одержується досить висока температура. Довжина хвилі, що має при цьому найбільшу інтенсивність,  $145 \text{ нм}$ . Визначити температуру нитки розжарення у момент її спалювання.

35. До якої області спектра належить довжина хвилі, що відповідає максимуму випромінювання Сонця, якщо температура його поверхні  $5800\text{K}$  ?
36. Із отвору площею  $10\text{ см}^2$  випромінюється щохвилини  $250\text{ кДж}$ . До якої області належить довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії?
37. У випромінюванні абсолютно чорного тіла максимум енергії припадає на довжину хвилі  $680\text{ нм}$ . Яку енергію випромінює  $1\text{ см}^2$  цього тіла за  $1\text{ с}$  і яка втрата його маси за  $1\text{ с}$  внаслідок випромінювання?
38. Довжина хвилі, яка відповідає максимуму енергії в спектрі абсолютно чорного тіла,  $720\text{ нм}$ , випромінювальна поверхня  $5\text{ см}^2$ . Визначити потужність випромінювання.
39. При нагріванні тіла довжина хвилі, на яку припадає максимум випромінювальної здатності, змінюється від  $1,4$  до  $1,1\text{ мкм}$ . У скільки разів збільшиться при цьому максимальна випромінювальна здатність тіла? Тіло вважати абсолютно чорним.
40. При нагріванні абсолютно чорного тіла, довжина хвилі на яку припадає максимум випромінювальної здатності, змістилася з  $1,4$  до  $1,1\text{ мкм}$ . На скільки змінилася при цьому температура тіла.
41. Температура абсолютно чорного тіла збільшилася від  $1327^\circ\text{C}$  до  $1727^\circ\text{C}$ . На скільки змінилася при цьому довжина хвилі, на яку припадає максимум його випромінювальної здатності?
42. Температура абсолютно чорного тіла зросла з  $1327^\circ\text{C}$  до  $1727^\circ\text{C}$ . У скільки разів збільшилася його максимальна випромінювальна здатність?
43. Визначити температуру печі, якщо відомо, що із отвору в ній розміром  $6,1\text{ см}^2$  випромінюється за  $1\text{ с}$   $8,28\text{ кал}$ . Випромінювання вважати близьким до випромінювання абсолютно чорного тіла.
44. Яку кількість енергії випромінює Сонце за  $1\text{ хв}$ ? Температура поверхні Сонця  $5800\text{K}$ . Сонце вважати абсолютно чорним тілом.
45. Яку енергію випромінює за  $1\text{ с}$   $1\text{ см}^2$  поверхні свинцю, що твердне? Коефіцієнт сирості прийняти  $0,6$ .

46. Потужність випромінювання абсолютно чорного тіла  $34 \text{ кВт}$ . Визначити

$\text{м}^2$

температуру цього тіла, якщо його поверхня становить  $0,6$

47. Нагріта до  $2500\text{К}$  металева поверхня площею  $10 \text{ см}^2$  щохвилини випромінює  $4 \cdot 10^4$  Дж енергії. Яку б енергію випромінювало б це тіло, якби воно було абсолютно чорним?

48. Нагріта до  $2500\text{К}$  металева поверхня площею  $10 \text{ см}^2$  щохвилини випромінює  $4 \cdot 10^4$  Дж енергії. Який коефіцієнт сірості поверхні.

49. Діаметр вольфрамової спіралі в електричній лампочці  $0,3 \text{ мм}$ , довжина спіралі  $5 \text{ см}$ . Через спіраль при напрузі  $127 \text{ В}$  протікає струм силою  $0,31 \text{ А}$ . Визначити температуру спіралі, вважаючи її сірим тілом  $\kappa=0,31$ .

50. Температура вольфрамової спіралі у  $25$ -ватній електричній лампочці  $2450\text{К}$ . Яка поверхня спіралі, якщо вона являє собою сіре тіло з  $\kappa=0,3$ ?

51. Вважаючи, що атмосфера поглинає  $10\%$  променевої енергії, що надходить від Сонця, визначити потужність, яку отримує від Сонця горизонтальна ділянка землі площею  $0,5 \text{ га}$ . Висота Сонця над горизонтом рівна  $30^\circ$ . Вважати Сонце абсолютно чорним тілом, температуру його поверхні прийняти рівною  $5800\text{К}$ .

$\text{м}^2$

52. Знаючи величину сонячної постійної для Землі ( $1,37 \text{ кВт/м}^2$ ), визначити сонячну постійну для Марса.

53. Визначити, яку енергію випромінює за  $1 \text{ с}$  з  $1 \text{ см}^2$  абсолютно чорне тіло, якщо максимум спектральної випромінювальної здатності цього тіла припадає на довжину хвилі  $4840 \text{ \AA}$ .

54. Потужність випромінювання абсолютно чорного тіла  $10 \text{ кВт}$ . Визначити площу поверхні цього тіла, якщо відомо, що довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної випромінювальної здатності тіла, становить  $7 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ .

55. До якої області спектра належить довжина хвилі, що відповідає максимуму спектральної випромінювальної здатності спіралі електричної лампочки ( $T=3000\text{ К}$ )? Порівняти з довжиною хвилі, до якої найбільш чутливе око людини. Спіраль вважати абсолютно чорною.
56. До якої області спектра належить довжина хвилі, що відповідає максимуму спектральної випромінювальної здатності, того випромінювання, яке утворюється у момент вибуху атомної бомби. Температура при цьому сягає  $10^7\text{ К}$ .
57. При нагріванні абсолютно чорного тіла довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світності, змінилася з  $0,69$  до  $0,5\text{ мкм}$ . У скільки разів збільшилася при цьому енергетична світність тіла?
58. Температура абсолютно чорного тіла зросла з  $1000$  до  $3000\text{ К}$ . У скільки разів збільшилася при цьому його енергетична світність?
59. Температура абсолютно чорного тіла зросла з  $1000$  до  $3000\text{ К}$ . На скільки змінилася при цьому довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світності?
60. Температура абсолютно чорного тіла зросла з  $1000$  до  $3000\text{ К}$ . У скільки разів збільшилася його максимальна спектральна густина енергетичної світності?

**T<sub>1</sub>**

61. Абсолютно чорне тіло знаходилось при температурі  $T_1 = 2900\text{ К}$ . У результаті його остигання довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світності, змінилася на  $\Delta\lambda = 9\text{ нм}$ .

**T<sub>2</sub>**

До якої температури  $T_2$  охоллоло тіло?

62. Поверхня тіла мала температуру  $1000\text{ К}$ . Потім одну його половину нагріли на  $100$  градусів, а другу охолодили на  $100$  градусів. Як і у скільки разів змінилася енергетична світність поверхні тіла?

63. Яку потужність необхідно підводити до чорної металевої кульки радіусом 2 см, щоб підтримувати її температуру на 27 градусів вищою температури оточуючого середовища – 20 °C ?
64. Чорна кулька остигає від температури 27 °C до 20 °C, на скільки змінилася довжина хвилі, що відповідає максимуму спектральної густини його енергетичної світності?
65. Визначити, на скільки зменшиться маса Сонця за рік у наслідок випромінювання. Сонце вважати абсолютно чорним тілом, температура якого 5800 K.
66. Вважаючи випромінювання Сонця постійним, визначити за який час його маса стане меншою на величину маси Землі. Сонце вважати абсолютно чорним тілом, температура якого 5800 K.
67. Середнє значення енергії, яку втрачає внаслідок випромінювання 1 см<sup>2</sup> поверхні землі за 1 хв., приймають рівним 0,13 кал. Яку температуру повинно мати абсолютно чорне тіло для випромінювання такої енергії?
68. Муфельна піч споживає потужність  $P=0,5$  кВт. Температура її внутрішньої поверхні при відкритому отворі діаметром 5 см становить 700 °C. Яка частина споживаної потужності розсіюється стінками ?
69. За означенням 1 лмє світловий потік, що випромінює абсолютно чорне тіло з поверхні 0,5305 м<sup>2</sup> при температурі тверднення платини (2042 K). Який коефіцієнт корисної дії такого випромінювача?
70. Експеримент показав, що максимум у спектрі випромінювання Сонця припадає на довжину хвилі 475 нм. Вважаючи Сонце абсолютно чорним тілом, визначити за цим показником температуру його поверхні. Розрахувати відносну похибку цього експерименту.
71. Нагріта до 1230 K куля діаметром 10 см випускає випромінювання потужністю  $P=1$  кВт. Визначити коефіцієнт сірості кулі.
72. До якої температури охолело абсолютно чорне тіло, якщо повна кількість випромінювальної ним енергії зменшилася у 16 разів? Початкова температура тіла становила 1727 °C .

73. Визначити різницю тих температур абсолютно чорного тіла, при яких максимума випромінювання співпадали б з початком і кінцем видимого спектра.
74. Яку температуру повинно мати абсолютно чорне тіло, щоб максимум його випромінювальної здатності припадав на ту ділянку спектра, до якої око людини найбільш чутливе?
75. Оцінити значення мінімальної довжини хвилі, на яку припадає максимум випромінювання металевого абсолютно чорного твердого тіла.
76. Сіре тіло ( $\kappa=0,7$ ) випромінює за 1 с з 1  $\text{см}^2$  поверхні енергію 4 Дж. Яка температура тіла?
77. Вважаючи Сонце абсолютно чорним тілом, визначити час, за який його маса зменшиться на 1%. Температура поверхні Сонця 5800 К.
78. Із віконця печі випускається випромінювання потужністю 20 Вт. Яка площа віконця, якщо температура печі 900 К? Піч вважати абсолютно чорним тілом.
79. У скільки разів повинна бути більшою температура сірого тіла ( $\kappa=0,5$ ) щоб випромінювана ним енергія була б така, як і для абсолютно чорного тіла?
80. Довжина хвилі на яку припадає максимум спектральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла, становить 700 нм. Поверхня випромінювання 6  $\text{см}^2$ . Яка потужність випромінювання?
81. Визначити найбільшу довжину хвилі випромінювання, при якій має місце фотоэффект у цезії, а також максимальну швидкість фотоелектронів, випущених з поверхні цього металу під дією випромінювання, довжина хвилі якого 190 нм.
82. Визначити максимальну кінетичну енергію електрона, випущеного молібденовою пластинкою під дією випромінювання, довжина хвилі якого 100 нм. Порівняти цю енергію із середньою енергією теплового руху електронів при температурі 300 К.
83. У разі опромінення металу гама-квантами з нього вилітають фотоелектрони з максимальною швидкістю 290 Мм/с. Визначити енергію квантів, їх імпульс та масу.



84. Визначити максимальну швидкість фотоелектронів, які вилітають з металу під дією гама-променів, довжина хвилі яких  $0,3 \text{ нм}$ .
85. Визначити максимальну швидкість фотоелектронів, які вилетіли з металу під дією випромінювання, енергія квантів якого  $1,53 \text{ MeV}$ .
86. На вольфрамову пластинку падає моноенергетичний пучок фотонів, довжина хвилі яких  $270 \text{ нм}$ . Визначити імпульс, який передається пластинці при поглинанні фотона з пучка, якщо при цьому пластинка випускає електрон під прямим кутом до напрямку руху фотона. Вважати, що швидкість електрона становить  $0,5$  від максимальної.
87. На металеву пластинку що приєднана до електрометра, падає рентгенівське випромінювання, довжина хвилі якого  $20 \text{ нм}$ . До якого потенціалу зарядиться пластинка?
88. Електрони, які випускаються металом під дією випромінювання, довжина хвилі якого  $\lambda_1 = 136 \text{ нм}$ , затримуються напругою  $U_1 = 6,6 \text{ В}$ , а ті, що випускаються під дією випромінювання, довжина хвилі якого  $\lambda_2 = 65,2$ , – напругою  $U_2 = 16,5 \text{ В}$ . Визначити за цими даними сталу Планка та роботу виходу для цього металу.
89. Чи буде мати місце фотоефект у літія, якщо він освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $589 \text{ нм}$  (жовта лінія у спектрі натрію)?
90. Визначити червону межу фотоефекту для срібла.
91. Червона межа фотоефекта для заліза відповідає довжині хвилі  $262 \text{ нм}$ . Визначити у  $eV$  роботу виходу електрона із заліза.
92. На поверхню деякого металу падають гама-промені ( $\lambda = 1,2 \text{ пм}$ ). Визначити швидкість вилітання фотоелектронів.
93. Робота виходу електронів з молібдену  $4,2 \text{ eV}$ . Яка швидкість електронів, що вилітають з поверхні цього металу при освітленні його променями з довжиною хвилі  $200 \text{ нм}$ ?
94. Яку довжину електромагнітної хвилі необхідно спрямувати на поверхню цинку, щоб швидкість фотоелектрона становила  $0,8 \text{ Мм/с}$ ?

95. На поверхню нікеля падає світло, довжина хвилі якого  $200 \text{ нм}$ . Червона межа фотоелекту для нікеля  $248 \text{ нм}$ . Визначити енергію падаючих фотонів і швидкість електронів.
96. На поверхню нікеля падає світло, довжина хвилі якого  $200 \text{ нм}$ . Червона межа фотоелекту для нікеля  $248 \text{ нм}$ . Визначити енергію виходу електронів і їх кінетичну енергію.
97. Червона межа фотоелекту для платини знаходиться біля  $198 \text{ нм}$ . Якщо платину прожарити при високій температурі, то червона межа фотоелекту стане рівною  $220 \text{ нм}$ . Пояснити ефект і визначити на скільки прожарювання зменшує роботу виходу електрона.
98. На незаряджену металеву пластинку, приєднану до електрометра, спрямували монохроматичний пучок рентгенівських променів. Коли пластинка зарядилася до  $124 \text{ В}$ , випускання фотоелектронів припинилося. Визначити довжину хвилі рентгенівських променів.
99. Червона межа фотоелекту для рубідію  $810 \text{ нм}$ . Яку зворотню різницю потенціалів необхідно прикласти до фотоелемента, щоб затримати електрони, які вилітають з рубідію під впливом ультрафіолетових променів з довжиною хвилі  $100 \text{ нм}$ ?
100. Під впливом світла з довжиною хвилі  $450 \text{ нм}$  ізольована металевая пластинка зарядилася до потенціалу  $0,75 \text{ В}$ . Визначити роботу виходу електронів з металу.
101. Червона межа фотоелекту для деякого металу рівна  $2750 \text{ \AA}$ . Яке мінімальне значення енергії фотона, що викликає фотоелект ?
102. Червона межа фотоелекту для заданого металу рівна  $2750 \text{ \AA}$ . Визначити роботу виходу електрона з цього металу.
103. Червона межа фотоелекту для заданого металу рівна  $2750 \text{ \AA}$ . Визначити максимальну швидкість електронів, що видаляються з цього металу світлом з довжиною хвилі  $180 \text{ нм}$ .
104. Червона межа фотоелекту для заданого металу рівна  $2750 \text{ \AA}$ . Метал освітлюється світлом з довжиною хвилі  $180 \text{ нм}$ . Визначити максимальну кінетичну енергію фотоелектронів.

105. Визначити частоту світла, яке видаляє з поверхні металу електрони що повністю затримуються оберненим потенціалом у  $3 \text{ В}$ . Фотоэффект у цього металу починається при частоті падаючого світла  $\Gamma_{\text{ц}}$ .
106. Визначити величину затримуючого потенціалу для фотоелектронів, які вилітають з поверхні калію при освітленні її світлом з довжиною хвилі  $330 \text{ нм}$ .
107. Затримуючий потенціал при фотоэффекті з платинової поверхні виявився рівним  $0,8 \text{ В}$ . Світлом, якої довжини хвилі, опромінювалася платина?
108. Кванти світла з енергією  $4,9 \text{ еВ}$  виривають фотоелектрони з металу, робота виходу з якого становить  $4,5 \text{ еВ}$ . Визначити максимальний імпульс, який сприймає поверхня при вильоті кожного електрона.
109. Для калію червона границя фотоэффекту становить  $0,62 \text{ мкм}$ . Яку максимальну швидкість можуть мати фотоелектрони, що вилітають при опроміненні калію фіолетовим світлом з довжиною хвилі  $0,42 \text{ мкм}$ ?
110. Мінімальна частота світла, що вириває електрони з поверхні металевого катода, дорівнює  $6,0 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ . За яких частот падаючого світла електрони, що вилетіли, повністю затримуються напругою  $3 \text{ В}$ ?
111. На поверхню деякого металу падає фіолетове світло з довжиною хвилі  $\lambda_1 = 0,40 \text{ мкм}$ , при цьому затримуюча напруга для вибитих світлом електронів  $U_1 = 2,0 \text{ В}$ . Чому дорівнює затримуюча напруга  $U_2$  при освітленні того ж самого металу червоним світлом з довжиною хвилі  $\lambda_2 = 0,77 \text{ мкм}$ ?
112. Довести, що явище фотоэффекту не може протікати на електронах провідності.
113. Чи виникає фотоэффект у цинку під дією випромінювання, що має довжину хвилі  $0,45 \text{ мкм}$ ?
114. Яку максимальну кінетичну енергію мають фотоелектрони, вирвані з оксиду барію, у випадку опромінювання світлом з частотою  $1 \text{ ПГц}$ ? Для оксиду барію робота виходу електронів становить  $1 \text{ еВ}$ .
115. Знайти максимальну кінетичну енергію фотоелектронів, вирваних з деякого металу, якщо запірна напруга дорівнює  $1,5 \text{ В}$ .

116. Яка максимальна швидкість фотоелектронів, якщо фотострум припиняється при запірній напрузі  $0,8 \text{ eV}$ ?
117. До вакуумного фотоелемента, катод якого виготовлено з цезію, прикладена запірна напруга  $2 \text{ В}$ . При якій довжині хвилі світла, що падає на катод, з'явиться фотострум?
118. Яку запірну напругу треба подати, щоб електрони спричинені ультрафіолетовим світлом з довжиною хвилі  $100 \text{ нм}$  з вольфрамового катода, не змогли створити струм у колі?
119. При якій мінімальній енергії квантів станеться фотоэффект на цинковій пластинці?
120. Довгохвильова межа фотоэффекту для міді  $282 \text{ нм}$ . Знайти роботу виходу електронів з міді (в  $\text{eV}$ ).
121. Довжина хвилі рентгенівського випромінювання після комптонівського розсіювання збільшилась з  $\lambda_1 = 2,0 \text{ нм}$  до  $\lambda_2 = 2,4 \text{ нм}$ . Яка кінетична енергія електронів, що вилітають, та їхня швидкість?
122. Порівняти найбільші комптонівські зміни  $\Delta\lambda_{\text{макс}}$  довжини хвилі при розсіянні фотонів на вільних електронах та протонах.
123. Рентгенівське випромінювання, довжина хвилі якого  $\lambda = 5 \text{ нм}$ , падає на речовину. Визначити довжину хвилі квантів, розсіяних у цій речовині вільними електронами під кутом  $90^\circ$ , а також імпульс електрона віддачі.
124. Рентгенівське випромінювання, довжина хвилі якого  $\lambda = 5 \text{ нм}$ , падає на речовину. Визначити довжину хвилі квантів, розсіяних у цій речовині вільними електронами під кутом  $180^\circ$ , а також кінетичну енергію електрона віддачі.
125. Обчислити комптонівське зміщення довжини хвилі та кут розсіяння фотона, початкова довжина хвилі якого  $\lambda = 3 \text{ нм}$ , а швидкість електрона віддачі  $\beta = 0,6 \text{ c}$ . До розсіяння електрон перебував у стані спокою.
126. Рентгенівські промені з довжиною хвилі  $\lambda = 0,708 \text{ \AA}$  розсіюються на парафіні. Визначити довжину хвилі рентгенівських променів розсіяних у напрямках  $2\pi$  та  $\pi$ .

127. Яка була довжина хвилі рентгенівського випромінювання, якщо при комптонівському розсіянні цього випромінювання графітом під кутом  $60^\circ$  довжина хвилі розсіяного випромінювання виявилася рівною  $2,54 \cdot 10^{-9}$  см?
128. Рентгенівські промені з довжиною хвилі  $\lambda = 0,2 \text{ \AA}$  зазнають комптонівське розсіяння під кутом  $90^\circ$ . Визначити зміну довжини хвилі рентгенівських променів при розсіянні та енергію електрона віддачі.
129. У явищі Комптона енергія падаючого фотона ділиться порівну між розсіяним фотоном і електроном віддачі. Кут розсіяння дорівнює  $2\pi$ . Визначити енергію і кількість руху розсіяного фотона.
130. Енергія рентгенівських променів становить  $0,6 \text{ MeV}$ . Визначити енергію електрона віддачі, якщо відомо, що довжина хвилі рентгенівських променів після комптонівського розсіяння змінилася на 20%.
131. Визначити зміну довжини хвилі світла при розсіянні його під кутом  $90^\circ$  на вільних протонах.
132. Визначити максимальні комптонівські зміни довжини хвилі для видимого світла ( $\lambda = 500 \text{ нм}$ ) і гама-променів ( $\lambda = 5 \text{ пм}$ ) для кута розсіяння  $90^\circ$ .
133. Визначити максимальні комптонівські зміни довжини хвилі при розсіянні фотонів на вільних електронах і на ядрах атома водню.
134. Атом водню випромінює фотон частотою  $\nu$ . Знайти зміну довжини хвилі фотона унаслідок передавання енергії атому при віддачі.
135. Рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі  $56,3 \text{ нм}$  розсіюється на графіті. Визначити довжину хвилі променів, розсіяних під кутом  $120^\circ$  до початкового напрямку рентгенівських променів.
136. Гама-промені з довжиною хвилі  $2,7 \text{ пм}$  зазнають комптонівського розсіювання. У скільки разів довжина хвилі випромінювання, розсіяного під кутом  $180^\circ$  до початкового напрямку, більша довжини хвилі падаючого випромінювання?
137. Фотон жорстких рентгенівських променів при співударі з електроном передав йому 9% своєї енергії. Визначити довжину хвилі розсіяного рентгенівського випромінювання.

138. Зміна довжини хвилі рентгенівських променів при комптонівському розсіянні становить  $2,4 \text{ нм}$ . Визначити кут розсіяння, якщо початкова довжина хвилі була  $10 \text{ нм}$ .
139. Зміна довжини хвилі рентгенівських променів при комптонівському розсіянні становить  $2,4 \text{ нм}$ . Визначити величину енергії, яку передав при цьому електрон віддачі. Початкова довжина хвилі становила  $10 \text{ нм}$ .
140. Чому ефект Комптона не спостерігається при розсіянні видимого світла? Виконати необхідні розрахунки.
141. Мінімальна довжина хвилі суцільного спектра рентгенівських променів, одержаних у результаті гальмування електронів на антикатоді рентгенівської трубки,  $0,5 \text{ нм}$ . Яка найбільша швидкість електронів?
142. Антикато́д рентгенівської трубки бомбардують електронами, швидкість яких  $100 \text{ Мм/с}$ . Визначити максимальну частоту випромінювання у суцільному рентгенівському спектрі з урахуванням залежності маси електрона від його швидкості руху.
143. При якій найменшій напрузі рентгенівська трубка здатна випромінювати промені з мінімальною довжиною хвилі  $13,3 \text{ нм}$ ?
144. Мінімальна довжина хвилі, яку випромінює рентгенівська трубка, що працює при напрузі  $40 \text{ кВ}$ , рівна  $31 \text{ нм}$ . Визначити за цими даними сталу Планка.
145. Рентгенівська трубка працює при напрузі  $30 \text{ кВ}$ . Яке найменше значення довжини хвилі рентгенівського випромінювання?
146. Визначити максимальну швидкість електронів, що долітають до антиката́да рентгенівської трубки, якщо короткохвильова межа рентгенівського спектра  $2 \text{ нм}$ .
147. Визначити короткохвильову межу суцільного рентгенівського спектра, якщо відомо, що зменшення прикладеної до рентгенівської трубки напруги на  $23 \text{ кВ}$  збільшує шукану довжину хвилі вдвічі.
148. Під якою напругою працює рентгенівська трубка, якщо “найжорсткіші” промені в рентгенівському спектрі цієї трубки мають частоту  $10^{19} \text{ Гц}$ ?

149. Для визначення мінімальної довжини хвилі в рентгенівському спектрі інколи користуються формулою  $\lambda = \frac{1,24}{U}$ , де  $U$  – напруга на трубці в кіловольтах. Вивести цю формулу. У яких одиницях буде виражена довжина хвилі?
150. При якій нарузі працює рентгенівська трубка, якщо її випромінювання падає на кристал  $\text{CaCO}_3$  і найменший кут між площиною кристала і пучком рентгенівських променів, при якому можна спостерігати відбивання, становить  $2^\circ 36'$ ? Постійна ґратки  $\text{CaCO}_3$  304 нм.
151. Яка постійна кристалічної ґратки  $\text{NaCl}$ , якщо монохроматичне рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі 71,2 нм відбиваються від його природної грані? Максимум першого порядку має місце при куті  $7^\circ 18'$ .
152. Обчислити довжину хвилі рентгенівського випромінювання, дифракційний максимум другого порядку для якого спостерігається у разі падіння на природну грань кристала  $\text{NaCl}$  під кутом ковзання  $11^\circ 30'$ . Віддаль між сусідніми атомними площинами кристала  $\text{NaCl}$  280 нм.
153. На поверхню кристала гіпсу, віддаль між атомними площинами якого  $d=0,303$  нм, падає рентгенівське випромінювання. Якщо кут падіння  $i = 75^\circ 31'$ , то для відбитих променів спостерігається дифракційний максимум першого порядку. Обчислити довжину хвилі  $\lambda$  рентгенівського випромінювання.
154. У рентгенівській трубці антикатод виготовлений із ніобію. Визначити

**К**

довжину хвилі та енергію кванта для \_\_\_\_\_-лінії.

155. Досліджуючи лінійчастий рентгенівський спектр деякого елемента,

**К<sub>α</sub>**

встановили, що довжина хвилі \_\_\_\_\_ - лінії становить 22 нм. Який це елемент?

156. Яку найменшу напругу слід прикласти до рентгенівської трубки, щоб одержати всі лінії K-серії, якщо матеріал антикатоду мідь?
157. Визначити постійну екранування у L-серії рентгенівських променів, якщо відомо, що при переході електрона в атомі вольфрама з M-шару на L-шар випромінюються рентгенівські промені з довжиною хвилі 1,43 Å.
158. Визначити для алюмінія товщину шару половинного ослаблення інтенсивності рентгенівських променів деякої довжини хвилі, якщо відомо, що масовий коефіцієнт поглинання алюмінієм цієї довжини

$$\mu^2$$

хвилі дорівнює 5,3 /кг.

159. У скільки разів зменшиться інтенсивність рентгенівських променів з довжиною хвилі 0,2 Å після проходження шару заліза товщиною 0,15 мм? Масовий коефіцієнт поглинання заліза для цієї довжини хвилі дорівнює

$$\mu^2$$

1,1 /кг.

160. Скільки шарів половинного ослаблення інтенсивності рентгенівських променів необхідно для зменшення інтенсивності у 80 разів.
161. Визначити довжину хвилі фотона, маса якого дорівнює масі спокою електрона, а також масу фотона, для якого довжина хвилі становить 15 пм.
162. Зазначивши зіткнення із дзеркальною поверхнею під кутом з нормаллю до неї 60°, фотон передає їй імпульс  $p = 3 \cdot 10^{-24}$  кг·м/с. Чому дорівнює маса кванта?
163. Чому дорівнює густина потоку  $n$  фотонів у рентгенівському випромінюванні, частота якого  $\nu = 5 \cdot 10^{16}$  Гц та інтенсивність  $I = 33$

$$\mu^2$$

мВт/ ?



164. Лазер, що працює у неперервному режимі, випускає монохроматичне випромінювання, довжина хвилі якого  $\lambda = 692,7 \text{ нм}$ . Потужність лазера  $P = 40 \text{ мВт}$ . Скільки фотонів він випускає щосекунди?
165. На поверхню нормально падає монохроматичне випромінювання, довжина хвилі якого  $\lambda = 648 \text{ нм}$ . Густина потоку  $n = 10^{20} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Коефіцієнт відбиття поверхні  $\rho = 0,8$ . Визначити тиск на цю поверхню.
166. На плоске дзеркало нормально падає випромінювання від  $\text{CO}_2$ -лазера ( $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ ), яке тисне на поверхню з силою  $F = 0,1 \text{ нН}$ . Визначити кількість фотонів  $N$ , що падають щосекунди на дзеркало.
167. Гелій-неоновий лазер безперервно випромінює світло з довжиною хвилі  $\lambda = 632,8 \text{ нм}$ . Скільки фотонів випромінює лазер за одну секунду, якщо його потужність  $P = 2,0 \text{ мВт}$ ?
168. Енергія кожного фотона в пучку монохроматичного випромінювання  $W = 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Яка довжина хвилі  $\lambda$  цього випромінювання у воді?
169. Світло падає на дзеркальну поверхню. Знайдіть тиск світла на цю поверхню, якщо інтенсивність випромінювання дорівнює  $I$ , а кут падіння  $\alpha$ .
170. Чи належить до складу видимого світла випромінювання, кванти якого мають енергію  $6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ?
171. Визначити довжину хвилі, якщо відповідний їй квант володіє енергією  $10^{-19} \text{ Дж}$ . До якої частини спектра належить ця довжина хвилі?
172. Яка довжина хвилі відповідає фотону, маса якого  $0,001 \text{ а.о.м.}$ ?
173. Енергія фотона  $1 \text{ MeV}$ . Визначити імпульс фотона.

**м<sup>2</sup>**

174. Густина енергії світового потоку на поверхні  $7 \text{ кВт/м}^2$ . Визначити величину світлового тиску для випадків, коли поверхня повністю відбиває всі промені та коли вона всі промені повністю поглинає.

175. Тиск випромінювання на плоске дзеркало  $0,2 \text{ Па}$ . Визначити енергію

$\text{м}^2$

світлового потоку на  $1$  поверхні дзеркала з коефіцієнтом відбивання  $0,6$ .

176. Світловий потік потужністю  $9 \text{ Вт}$  нормально падає на поверхню площею  $10$ , коефіцієнт відбивання якої  $0,8$ . Який тиск сприймає така поверхня?

$\text{м}^2$

177. На поверхню площею  $10 \text{ см}^2$  падає пучок фотонів інтенсивністю  $n = 10^{19}$  фотонів за секунду. Довжина хвилі падаючого світла  $500 \text{ нм}$ . Визначити величину світлового тиску на поверхню якщо коефіцієнт відбивання поверхні  $0,7$ .

178. Електрична лампа втрачає на випромінювання  $45 \text{ Вт}$ . Визначити тиск променевої енергії на дзеркальну поверхню, розташовану на відстані  $1 \text{ м}$  від лампи нормально до падаючих променів.

179. Визначити діаметр надувного кулеподібного супутника, що рухається навколо Землі, якщо сила тиску сонячного світла на супутник  $11,2 \text{ мН}$ , коефіцієнт відбивання світла від поверхні супутника дорівнює одиниці,

$\text{м}^2$

сонячна постійна  $1,4 \text{ кВт/м}^2$ .

180. Як зорієнтується у променях Сонця супутник сферичної форми, одна половина якого дзеркальна, а друга чорна? Дайте розгорнуте пояснення.

181. Білим світлом послідовно освітлюють червону, зелену і синю поверхні. На яку з цих поверхонь світло чинить більший тиск? Вважати, що число відбитих фотонів у всіх випадках однакова.

182. Чорна поверхня послідовно освітлюється однаковою кількістю фотонів червоного, зеленого і синього світла. Чи однаковий тиск чинить світло в цих випадках?

183. З якою швидкістю повинен рухатись електрон, щоб кількість його руху була рівна кількості руху фотона з довжиною хвилі  $520\text{ нм}$ ?
184. Яку енергію повинен мати фотон, щоб його маса була рівна масі спокою протона? Проаналізуйте одержаний результат.
185. Кількість руху, що переносить монохроматичний пучок фотонів через

$\text{м}^2$

площину  $S=2\text{ м}^2$  за час  $t=0,5\text{ хв.}$ , рівна  $3 \cdot 10^{-4}\text{ Дж}$ . Визначити для цього пучка енергію, що падає на одиницю поверхні за одиницю часу.

186. Визначити тиск сонячних променів на абсолютно чорне тіло, яке знаходиться від Сонця на такій же відстані, що й Земля. Значення

сонячної постійної вважати рівною  $8,21\text{ Дж/хв}$ .

187. Яку масу повинна мати кометна частинка, що знаходиться від Сонця на такій же відстані, що й Земля, щоб сила світлового тиску на неї зрівноважувалася силою притягання до Сонця? Поверхню частинки

вважати рівною  $0,5\text{ м}^2$ . Значення сонячної постійної  $8,21\text{ Дж/хв}$ .

188. Визначити тиск світла на стінки електричної 100-ватної лампи. Колба лампи являє собою сферичну посудину радіусом  $5\text{ см}$ . Стінки лампи відбивають  $4\%$  і пропускають  $6\%$  світла, що падає на них. Вважати, що вся споживана потужність витрачається на випромінювання.

189. На поверхню  $100\text{ см}^2$  щохвилини падає  $63\text{ Дж}$  світлової енергії. Визначити значення світлового тиску у випадках дзеркальної та абсолютно чорної поверхонь.

190. Монохроматичний пучок світла ( $\lambda = 490 \text{ нм}$ ) при нормальному падінні на

$$1 \text{ м}^2$$

поверхню чинить тиск  $5 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м}^2$ . Скільки квантів світла падає щосекунди на одиницю поверхні з коефіцієнтом відбивання 0,25?

191. Колба електричної лампи являє собою сферу радіусом 3 см. Частина стінки колби зсередини посріблена. Лампа споживає потужність 60 Вт, 80% якої витрачається на випромінення. Визначити, у скільки разів тиск газу в колбі (13,3 мкПа) менший світлового тиску на посріблену частину стінки колби з коефіцієнтом відбивання 0,8.

192. Світло падає на плоску пластину під кутом  $i \neq 0$ . У якому напрямку буде відштовхуватись пластинка, якщо: а) її поверхня поглинає все світло? б) її поверхня дзеркально відбиває світло?

193. Виходячи з формули світлового тиску на абсолютно чорне тіло  $p = \frac{I}{c}$ , показати, що кількість руху одного фотона рівна  $\frac{h\nu}{c}$ .

194. Лампа випромінює рівномірно у всіх напрямках монохроматичне світло, довжина хвилі якого 589 нм. Потужність випромінювання 100 Вт. Чому дорівнює густина потоку фотонів на відстані 2 м від лампи?


195. Нижня межа потужності випромінювання ( $\lambda = 500 \text{ нм}$ ), яке око сприймає як світло,  $2,1 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$ . Верхня межа безболісного сприйняття –  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$ . Скільки фотонів потрапляє в кожному випадку на сітківку за 1 секунду?

196. Визначити довжину хвилі променів, фотони яких мають таку саму енергію, що й електрон, який пролетів різницю потенціалів 4 В.

197. Джерело світла, потужність якого 100 Вт, випускає  $5 \cdot 10^{20}$  фотонів щосекунди. Обчислити середню довжину хвилі випромінювання.

198. При якій швидкості електрони матимуть енергію, що дорівнює енергії фотонів ультрафіолетового світла з довжиною хвилі 200 нм?

199. Визначити імпульс фотона ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі  $100 \text{ нм}$ .
200. Який імпульс фотона, що має енергію  $3 \text{ eV}$ ?
201. У скільки разів довжина хвилі випромінювання атома водню під час переходу електрона з третього енергетичного рівня на другий більша від довжини хвилі, зумовленої переходом електрона з другого енергетичного рівня на перший?
202. У скільки разів змінюється енергія атома водню під час переходу електрона з першого енергетичного рівня на третій? під час переходу електрона з четвертого енергетичного рівня на другий?
203. У видимій частині спектру Сонця Й. Фраунгофер виявив чотири лінії поглинання водню. Найбільша довжина хвилі в спектрі поглинання була  $656 \text{ нм}$ . Визначити три інші лінії.
204. Визначити сталу Рідберга для водню, коли відомо, що під час переходу атома водню з четвертого енергетичного стану у другий випромінюється фотон, який відповідає зеленій лінії в спектрі водню з довжиною хвилі  $486,13 \text{ нм}$ .
205. Світло якої довжини хвилі треба спрямувати на водень, щоб іонізувати атоми?
206. Яку мінімальну швидкість повинні мати електрони, щоб ударом перевести атом водню з першого енергетичного стану в п'ятий?
207. На якій орбіті швидкість електрона атома водню дорівнює  $734 \text{ км/с}$  ?
208. Визначити кутову швидкість електрона на першій борівській орбіті атома водню.
209. Атом водню перейшов із нормального стану у збуджений, який характеризується головним квантовим числом 2. Визначити енергію збудження атома.
210. У скільки разів збільшиться радіус орбіти електрона в атомі водню, що знаходиться в основному стані, при збудженні його квантом з енергією  $12,09 \text{ eV}$ ?

211. Перехід електрона в атомі водню з орбіти, для якої квантове число становить  $m$ , в основний стан супроводжується випромінюванням фотона з довжиною хвилі  $102,6\text{нм}$ . Знайти радіус  $m$ -ної орбіти.
212. Визначити верхню і нижню межі серії Лаймана у спектрі водню.
213. Визначити довжини хвиль першої, другої і третьої ліній видимої серії водню.
214. Найбільша довжина хвилі спектральної водневої лінії серії Лаймана  $121,6\text{нм}$ . Виходячи саме з цього, визначити найбільшу довжину хвилі в серії Бальмера.
215. Яку роботу слід виконати, щоб видалити електрон з другої орбіти атома водню за межі притягання його ядром?
216. Обрахувати найменше значення енергії, при якому у результаті збудження атомів водню з'явиться повний спектр.
217. Атомарний водень перевели з нормального стану у збуджений, що характеризується квантовим числом 3. Які спектральні лінії можуть з'явитися у спектрі водню при переході атома із збудженого стану в нормальний?
218. Які спектральні лінії з'являються у видимій частині спектра при збудженні атома водню електронами з енергією  $13\text{eV}$ ?
219. Атом водню освітлюється ультрафіолетовим випромінюванням з довжиною хвилі  $100\text{нм}$ . Визначити, які спектральні лінії з'являються у спектрі водню.
220. Показати, що для атома водню на борівських стаціонарних орбітах уміщується ціле число довжин хвиль де Бройля.
221. Визначити енергію іонізації атома водню, якщо він перебуває у першому збудженому стані.
222. Визначити енергію іонізації атома водню, якщо він перебуває у другому збудженому стані.
223. Обчислити перші чотири циклічні частоти  електромагнітного випромінювання, які належать до видимої частини спектра атома водню.

224. Яку швидкість матиме внаслідок віддачі атом водню у разі випускання випромінювання, зумовленого переходом атома з першого збудженого стану до основного?
225. Визначити довжину хвилі  $\lambda$  випромінювання, яке випускається при переході двічі іонізованого атома літію з четвертого рівня на другий.
226. Визначити сталу Рідберга для гелію.
227. Деякий космічний об'єкт має воднеподібний спектр, довжини хвиль в якому у 9 разів коротші, ніж в атомарного водню. Якому елементові належить цей спектр?
228. Сталі Рідберга для водню та гелію дорівнюють відповідно  $R_H = 10967757,6 \text{ м}^{-1}$  і  $R_{He}$ . Встановити відношення  $m_e$  та  $m_N$ , де  $m_e$ ,  $m_N$  і – відповідно маса електрона, протона і ядра гелію.
229. Знайти числове значення кінетичної, потенціальної і повної енергії електрона на першій борівській орбіті атома водню.
230. Обчислити кінетичну енергію електрона, який перебуває на  $n$ -й орбіті атома водню. Задачу розв'язати для  $n=1, 2, 3$  та  $\infty$ .
231. Знайти період обертання електрона на першій борівській орбіті в атомі водню та його кутову швидкість на цій орбіті.
232. Визначити інтервал довжин хвиль спектральних ліній водню у видимій області спектра.
233. Визначити потенціал іонізації атома водню.
234. Визначити перший потенціал збудження атома водню.
235. Яку найменшу енергію (в eV) повинні мати електрони, щоб при збудженні атомів водню ударами цих електронів з'явилися всі лінії всіх серій спектра водню?
236. Яку найменшу швидкість повинні мати електрони, щоб при збудженні атомів водню ударами цих електронів з'явилися всі лінії всіх серій спектра водню?

237. Знайти радіус першої борівської електронної орбіти для одноразово іонізованого атома гелія, та швидкість електрона на ній.
238. У яких межах повинні знаходитися довжини хвиль монохроматичного світла, щоб при збудженні атомів водню квантами цього світла радіус орбіти електрона збільшився у 9 разів?
239. У яких межах повинні знаходитися довжини хвиль монохроматичного світла щоб при збудженні атомів водню квантами цього світла з'явилися три спектральні лінії?
240. У яких межах повинна знаходитися енергія бомбардуючих електронів, щоб при збудженні атомів водню ударами цих електронів спектр водню мав лише одну спектральну лінію?
241. Знайти довжину хвилі де Бройля для атома водню, що рухається при кімнатній температурі з найбільш імовірною швидкістю.
242. Знайти відношення довжин хвиль де Бройля для електрона і протона, що прискорені однаковою різницею потенціалів.
243. Знайти довжину хвиль де Бройля для електрона і протона, прискорених різницею потенціалів 100 В.
244. Знайти довжину хвилі де Бройля для атома водню, що рухається зі швидкістю, рівній середній квадратичній швидкості при температурі 300 К.
245. Знайти довжину хвилі де Бройля для кульки масою  $10^{-8}$  кг, яка рухається з першою космічною швидкістю.
246. Знайти довжину хвилі де Бройля для електрона, кінетична енергія якого 1 MeV.
247. Заряджена частинка, прискорена різницею потенціалів 200 В, має довжину хвилі де Бройля рівну 0,0202 Å. Визначити масу цієї частинки, якщо її заряд рівний заряду електрона.
248. Нейтрон, дебройлівська довжина хвилі якого  $\lambda = 1,8$  нм, дифундує у сповільнювачі, пружно розсіявся на частинці, що перебувала в стані спокою і мала масу спокою в  $n=4$  рази більшу від маси нейтрона. Визначити дебройлівську довжину хвилі нейтрона після розсіяння.



249. Визначити дебройлівську довжину хвилі електрона в телевізійному кінескопі, анодна напруга в якого  $29 \text{ кВ}$ .
250. Паралельний пучок моноенергетичних електронів нормально падає на щілину завширшки  $a=10 \text{ мкм}$ . Обчислити швидкість цих електронів, якщо відомо, що кутова ширина центрального дифракційного максимуму  $0,1^\circ$ .
251. Швидкість теплових нейтронів у реакторі близько  $2,5 \text{ км/с}$ . Визначити довжину хвилі де Бройля для таких нейтронів.
252. Знайти довжину хвилі де Бройля для електрона, що рухається зі швидкістю  $0,8$  швидкості світла.
253. Визначити довжину хвилі де Бройля для протона з кінетичною енергією  $100 \text{ еВ}$ .
254. Використовуючи співвідношення невизначеностей, оцінити швидкість протона в атомному ядрі.
255. Знайти довжину хвилі де Бройля для альфа-частинки, що рухається з середньою квадратичною швидкістю при температурі  $25^\circ\text{C}$ .
256. Визначити кінетичну енергію електрона якщо довжина хвилі де Бройля для нього  $100 \text{ нм}$ .
257. Електрон прискорений різницею потенціалів  $510 \text{ кВ}$ . Визначити довжину хвилі де Бройля для такого електрона.
258. Слід від пучка електронів на екрані електронно-променевої трубки має діаметр  $d=0,5 \text{ мм}$ , відстань від електронної гармати до екрана  $L=20 \text{ см}$ , прискорювальна напруга  $10 \text{ кВ}$ . За допомогою співвідношення невизначеностей оцінити невизначеність координати електрона  $\Delta x$  на екрані.
259. Електрон рухається по другій орбіті атома водню. Визначити для такого електрона довжину хвилі де Бройля.
260. У телевізійній трубці проекційного типу електрони розганяються до швидкості  $10^8 \text{ м/с}$ . Визначити довжину хвилі катодних променів.

261. Використовуючи співвідношення невизначеностей для енергію та часу, обчислити ширину енергетичного рівня  $\Delta E$  атома водню, час життя якого  $10^{-9}$  с, якщо він перебуває у збудженому стані.
262. Використовуючи співвідношення невизначеностей, обчислити час життя системи, для якої ширина енергетичного рівня  $\Delta E = 10$  eV.
263. Встановити відносну невизначеність енергії для збудженого рівня ядра  ${}^2_{10}\text{F}$ , якому відповідає енергія  $E = 14$  MeV, а час життя  $\tau = 0,1$  мкс.
264. На великому адронному колайдері протони розганяються до енергій 2000 GeV. Яка довжина хвилі прискорених протонів?
265. Куля масою 8 г рухається зі швидкістю 800 м/с. Яка довжина хвилі де Бройля для цієї кулі?
266. Невизначеність перебування електрона в заданому місці 0,05 нм, що дорівнює радіусу першої борівської орбіти в атомі водню. Оцінити невизначеність імпульсу електрона.
267. Знайти довжину хвилі де Бройля електронів з енергією  $1,6 \cdot 10^{-14}$  Дж.
268. Перевірити, чи має рівняння Шредінгера для вільної частинки ( $\vec{U} = 0$ ) розв'язок у вигляді сферичної хвилі  $\Psi(\vec{r}, t) = \frac{A}{r} e^{-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ , де A-стала.
269. Чи може стан вільної частинки ( $\vec{U} = 0$ ) описуватися плоскою хвилею вигляду  $\Psi(\vec{r}, t) = A \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \alpha)$ , де A-стала.
270. Довжина хвилі де Бройля, що описує вільний електрон,  $\lambda = 2$  Å. Визначити частоту  $\omega$  цієї хвилі і енергію E частинки.
271. Частинка перебуває в основному стані, якому відповідає енергія 8,35 MeV, в одновимірній прямокутній нескінченній потенціальній ямі ( $0 \leq x \leq l$ ). Ширина ями  $l = 5 \cdot 10^{-15}$  м. Визначити масу частинки.
272. Гармонічний осцилятор перебуває в стані, головне квантове число якого  $n=3$ . Маса осцилятора  $m = 9 \cdot 10^{-15}$  кг, циклічна частота коливань  $\omega = 3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ . Яка класична амплітуда A коливань відповідає цьому стану?

273. Ширина прямокутного потенціального бар'єра  $l=0.5 \text{ нм}$ . Різниця енергій  $U_0 - E = 0,8 \text{ eB}$ . Як зміниться ймовірність проходження електрона крізь цей бар'єр, якщо різницю енергій збільшити в 9 разів?

274. Чому дорівнює модуль спінового моменту  $M_s$  електрона? Яких значень може набувати спінове квантове число системи з двох електронів?

275. Молекула  $\text{H}_2^{200}\text{Cl}^{35}$  емітує фотон, довжина хвилі якого  $\lambda = 4,4 \text{ см}$  при обертальному переході зі стану, в якому обертальне квантове число  $r=1$ , у стан  $r=0$ . Визначити міжатомну віддаль  $r_0$  цієї молекули.

276. Коефіцієнт жорсткості  $\kappa$  молекули  $\text{HF}$  дорівнює  $966 \text{ Н/м}$ . Визначити енергію нульових коливань цієї молекули.

$E_r$

277. Обчислити енергії найнижчих чотирьох збуджених обертальних

$\text{H}_2$

енергетичних станів молекули водню. Вважати, що віддаль між атомами водню у молекулі  $r_0 = 7,4 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ .

278. Атом ртуті спонтанно випускає випромінювання, довжина хвилі якого  $\lambda = 253,7 \text{ нм}$ . Середній час перебування атома ртуті у збудженому стані  $\tau = 9,8 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ . Визначити кількість  $N$  збуджених атомів ртуті, якщо потужність випромінювання  $P=25 \text{ мВт}$ .

279. При дослідженні електронного парамагнітного резонансу високочастотне електромагнітне випромінювання, що поширюється по хвилеводах, має довжину хвилі  $3,2 \text{ см}$ . Визначити індукцію  $B$  сталого однорідного магнітного поля, при якому відбувається резонансне поглинання енергії електроном.

280. Вважаючи, що температура переходу металу з нормального стану в надпровідний, оцінити енергію зв'язку куперівської пари.

## 7. ТАБЛИЦІ ДЕЯКИХ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

### 7.1. Основні фізичні константи

	Назва	Значення констант в одиницях СІ
1.	Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
2.	Гравітаційна стала	$G = 6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
3.	Число Авогадро	$N_A = 6,0249 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$
4.	Стала Планка	$h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
5.	Стала Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
6.	Стала Віна	$b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
7.	Заряд електрона	$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
8.	Стала Рідберга	
9.	Маса спокою електрона	$m_e = 9,1093 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ а.о.м.} = 0,511 \text{ Мев}$
10.	Маса спокою протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.о.м.} = 938,281 \text{ Мев}$
11.	Маса спокою нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.о.м.} = 939,567 \text{ Мев}$
12.	Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}/\text{м}$
13.	Магнітна стала	$\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}/\text{м}$
14.	Комптонівська довжина хвилі електрона	$\lambda = 2,4268 \cdot 10^{-12} \text{ м}$

### 7.2. Червона межа фотоелектру 7.3. Робота виходу електронів з металу

1.	Алюміній	4,25
2.	Залізо	4,47
3.	Калій	2,22
4.	Літій	2,38
5.	Мідь	4,40
6.	Натрій	2,35
7.	Нікель	5,00

(в нм)

(в еВ)

1.	Платина	233,3
2.	Золото	265,1
3.	Нікель	275,7
4.	Залізо	277,6
5.	Срібло	277,6
6.	Мідь	282,0
7.	Алюміній	291,9
8.	Цинк	310,2
9.	Літій	521,3
10.	Натрій	528,0
11.	Калій	558,9
12.	Цезій	629,8
13.	Вольфрам	273,5

8.	Платина	5,32
9.	Рубідій	2,13
10.	Срібло	4,47
11.	Цезій	1,97
12.	Цинк	4,00
13.	Вольфрам	4,54

#### 7.4. Значення синусів і тангенсів

Градуси	Синуси	Тангенси	Градуси	Синуси	Тангенси
0	0.0000	0.0000	46	0.7193	1.036
1	0.0175	0.0175	47	0.7314	1.072
2	0.0349	0.0349	48	0.7431	1.111
3	0.0523	0.0524	49	0.7547	1.150
4	0.0698	0.0699	50	0.7660	1.192
5	0.0872	0.0875	51	0.7771	1.235
6	0.1045	0.1051	52	0.7880	1.280
7	0.1219	0.1228	53	0.7986	1.327
8	0.1392	0.1405	54	0.8090	1.376
9	0.1564	0.1584	55	0.8192	1.428
10	0.1736	0.1763	56	0.8290	1.483
11	0.1908	0.1944	57	0.8387	1.540
12	0.2079	0.2126	58	0.8480	1.600
13	0.2250	0.2309	59	0.8572	1.664
14	0.2419	0.2493	60	0.8660	1.732
15	0.2588	0.2679	61	0.8746	1.804
16	0.2756	0.2867	62	0.8829	1.881
17	0.2924	0.3057	63	0.8910	1.963
18	0.3090	0.3249	64	0.8988	2.050
19	0.3256	0.3443	65	0.9063	2.145
20	0.3420	0.3640	66	0.9135	2.246
21	0.3584	0.3839	67	0.9205	2.356
22	0.3746	0.4040	68	0.9272	2.475
23	0.3907	0.4245	69	0.9336	2.605
24	0.4067	0.4452	70	0.9397	2.747
25	0.4226	0.4663	71	0.9455	2.904
26	0.4384	0.4877	72	0.9511	3.078

27	0.4510	0.5095	73	0.9563	3.271
28	0.4695	0.5317	74	0.9613	3.487
29	0.4818	0.5543	75	0.9659	3.732
30	0.5000	0.5574	76	0.9703	4.011
31	0.5150	0.6009	77	0.9744	4.331
32	0.5299	0.6249	78	0.9781	4.705
33	0.5446	0.6494	79	0.9816	5.145
34	0.5592	0.6745	80	0.9848	5.671
35	0.5736	0.7002	81	0.9877	6.314
36	0.5878	0.7256	82	0.9903	7.115
37	0.6018	0.7536	83	0.9925	8.114
38	0.6157	0.7813	84	0.9945	9.514
39	0.6293	0.8098	85	0.9962	11.34
40	0.6428	0.8391	86	0.9976	14.30
41	0.6561	0.8693	87	0.9986	19.08
42	0.6691	0.9004	88	0.9994	28.64
43	0.6820	0.9325	89	0.9998	57.29
44	0.6947	0.9657	90	1.000	$\infty$
45	0.7071	1.0000			

Навчально-методичне видання

**Богатирьов Олег Іванович**  
**Кулик Людмила Олександрівна**  
**Ткаченко Анна Валеріївна**

**Фізика атома**

Розрахунково-графічні роботи  
Навчально-методичний посібник  
для студентів фізичних спеціальностей

Редактор: *Богатирьов Олег Іванович*

Коректор: *Клочай Володимир Анатолійович*

Комп'ютерний набір: *Бандурка Тетяна Олександрівна*

Верстка: