

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

Рекомендовано до друку
кафедрою загальної фізики
Протокол № 9 від 07.03.2006

ЗАВДАННЯ
з фізики для самостійної роботи студентів
нефізичних спеціальностей
і методичні вказівки щодо їхнього виконання
(Додаток до робочої навчальної програми)

Частина 5
Фізика атома та атомного ядра

Львів
Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка
2006

Укладачі: доц. Караван Юрій Володимирович
доц. Мельничук Борис Леонтійович
доц. Токар Юрій Семенович

Редактор Лоїк Ірина Миколаївна

ЗАВДАННЯ
з фізики для самостійної роботи студентів
нефізичних спеціальностей
і методичні вказівки щодо їхнього виконання
(Додаток до робочої навчальної програми)

Частина 5. Фізика атома та атомного ядра

Підп. до друку 16.06.06 р. Формат 60x84/16. Папір друк. №1
Друк на різногр. Умовн. друк. арк. 3,3. Обл.-вид. арк.3,4. Тираж 200. Зам. 444.

Видавничий центр Львівського національного університету імені Івана Франка
79000 м. Львів, вул. Дорошенка, 41

Пояснювальна записка

У частині 5 подано методичні вказівки для самостійної роботи студентів з теоретичної і практичної частини перелічених тем дисципліни:

- 5.1. Квантова природа світла.
- 5.2. Фотоелектричний ефект.
- 5.3. Елементи атомної фізики.
- 5.4. Елементи фізики атомного ядра.
- 5.5. Елементарні частинки.

Кожна тема, зазвичай, охоплює три частини:

- 1) перелік теоретичного матеріалу, розглянутого на лекції, з його подальшим опрацюванням та осмисленням;
- 2) короткий виклад матеріалу з цих питань з методичними вказівками щодо його вивчення, приклади розв'язування задач;
- 3) перелік задач, які студентам необхідно розв'язати.

Терміни виконання завдань з кожної теми – до початку розгляду наступних тем на лекції, а завдання п. 3 – до розгляду теоретичного матеріалу наступного розділу.

Контроль за виконанням завдань для самостійної роботи студентів з теоретичної частини дисципліни відбувається у формі контрольного індивідуального чи фронтального опитування студентів на лекційних і практичних заняттях і перевірки робочих конспектів з теоретичних питань.

З кожного розділу дисципліни студенти виконують також комплексні індивідуальні завдання і захищають їх у вигляді письмової контрольної роботи. Мета кожного індивідуального завдання – систематизувати та поглибити знання студентів з матеріалу відповідного розділу.

На підставі оцінок індивідуальних завдань виводиться підсумкова модульна оцінка з кожного розділу, яку враховують при виставленні оцінки підсумкового контролю за семестр.

Тема 5.1. Квантова природа світла

Опрацювати такі питання лекційного матеріалу:

- квантова природа світла;
- теплове випромінювання;

- люмінесценція;
- явище Комптона;
- тиск світла;
- хімічна дія світла.

Квантова природа світла. У ч. 4 розглянуто сукупність явищ, зумовлених хвильовою природою світла. При взаємодії світлового поля з атомами та окремими електронами хвильова модель недостатньо відображає дійсність. Теплове випромінювання, фотоелектричний ефект, люмінесценція, ефект Комптона та безліч інших природних явищ стають зрозумілими за умови, що світло обмінюється з речовиною енергією та кількістю руху не неперервно, а порціями (*квантами*). Інша назва світлових квантів – *фотони*. Планк теоретично встановив (а практика згодом це підтвердила), що енергія одного акту випромінювання пропорційна частоті світла ν і дорівнює $h\nu$, де h – *стала Планка* чисельно рівна $6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Айнштайн сформулював фундаментальне для сучасної фізики положення, що “елементарні поля” – кванти – зберігають своє уособлене один від одного існування і незалежно взаємодіють з речовиною як частинки.

Отже, світло є складнішим утворенням, ніж звичайний хвильовий процес, або потік частинок. За сучасних уявлень воно має *дуалістичну природу* (квантово-хвильову), зумовлену відмінністю протікання фізичних процесів у макро- та мікропросторах.

Теплове випромінювання фізичних об'єктів різне і залежить від природи та стану цих об'єктів, передусім їхньої поверхні. Проте існують важливі характерні особливості цього випромінювання, які зручно систематизувати та дослідити, вивчаючи випромінювання деякого стандартного випромінювача. Таким стандартом є *абсолютно чорне тіло*.

Чорне тіло - це порожнина, яка містить світло за умов теплової рівноваги. Прикладом подібного тіла є невелика пічка, у якій світло після випромінювання з її внутрішньої поверхні багаторазово відбивається від стінок, перш ніж вийти через невеликий отвір назовні.

Введемо поняття *поглинальної здатності тіла* щодо випромінювання певної частоти ν при температурі T – $a(\nu, T)$ як частку падаючого випромінювання, яку тіло поглинає. Для абсолютно чорного тіла $a(\nu, T) = 1$, у інших тіл $a(\nu, T) < 1$. Відповідно, $r(\nu, T)$ та $e(\nu, T)$ – *відбивальна* та *випромінювальна* здатності тіла. Отже, $r(\nu, T) + a(\nu, T) = 1$ (для непрозорих тіл).

Закон Кірхгофа стверджує, що випромінювальні здатності усіх чорних тіл однакові. Їх позначають $\epsilon(\nu, T)$.

Користуючись поняттям чорного тіла як допоміжним, Кірхгоф встановив, що для усіх тіл відношення випромінювальної здатності до поглинальної для певної температури і частоти є однаковим і дорівнює випромінювальній здатності чорного тіла за тих же значень ν і T :

$$\frac{e_1(\nu, T)}{a_1(\nu, T)} = \frac{e_2(\nu, T)}{a_2(\nu, T)} = \epsilon(\nu, T). \quad (5.1.1)$$

Експериментально встановлено залежності $\epsilon(\nu, T)$ від частоти при різних температурах, однак лише користуючись поняттям дискретності порцій випромінювання Планк теоретично вивів формулу для $\epsilon(\nu, T)$, яка задовольняє ці експериментальні дані:

$$e(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (5.1.2)$$

де k – постійна Больцмана; c – швидкість світла.

Закон Стефана-Больцмана: повна енергія, яку випромінює чорне тіло при температурі T за одиницю часу з одиниці поверхні у тілесний кут 2π (*енергетична світність тіла*):

$$E(T) = \int_0^\infty \epsilon(\nu, T) d\nu = \sigma T^4, \quad (5.1.3)$$

де $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ (*стала Стефана-Больцмана*).

Функція $\epsilon(\nu, T)$ за фіксованої температури досягає найбільшого значення при деякій частоті $\nu_{\text{макс}}$. Цю частоту визначають за формулою (5.1.2.), прирівнюючи першу похідну $\epsilon(\nu, T)$ по ν нулю:

$$\nu_{\text{макс}}(T) = \text{const} \cdot T \quad (5.1.4.)$$

або, якщо перейти від частот до довжин хвиль:

$$\lambda_{\text{макс}} \cdot T = \nu. \quad (5.1.5)$$

Постійна ν дорівнює $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Вираз (5.1.5) відображає *закон зміщення Віна*, за яким максимум кривої $\epsilon(\nu, T)$ зсувається віссю абсцис ν пропорційно температурі.

Люмінесценцію називають надлишкове щодо теплового за певної температури власне випромінювання деяких речовин – *люмінофорів*. Інша назва – *холодне свічення*. Це явище можливе за умови існування зовнішнього джерела збудження. За типом збудження розрізняють: *фотолюмінесценцію* або *флуоресценцію* (джерело збудження – ультрафіолетове випромінювання або короткохвильова ділянка видимої частини спектра), *катодолюмінесценцію* (джерело збудження – катодні промені), *рентгенолюмінесценцію* (джерело збудження – рентгенівські промені), *хемілюмінесценцію* (джерело збудження – хімічні реакції) тощо.

Люмінесцентне свічення є відмінним від теплового випромінювання і не підкоряється його законам. Натомість для люмінесценції встановлено, що вона вирізняється більшою довжиною хвилі, ніж збуджуюче її джерело. Адже частина енергії, яку поглинає люмінесцентна речовина, витрачається на різні молекулярні процеси, отож енергія, яку поверне люмінофор як люмінесцентне випромінювання, буде меншою. Зміщення люмінесцентного випромінювання у бік більших довжин хвиль називають *правилом Стокса*.

Ефективність перетворення абсорбованої енергії в енергію люмінесценції характеризують *енергетичним виходом люмінесценції* $B_{\text{ен}}$, який є відношенням енергії люмінесценції до енергії збудження.

Явище Комптона є одним із найяскравіших проявів квантової природи світла. Досліджуючи розсіяння рентгенівських променів у газах, Комптон помітив, що довжина хвилі λ' променів, розсіяних під деяким кутом ϕ до початкового напрямку,

відрізняється від довжини хвилі λ падаючих променів на деяку величину $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_0(1 - \cos \varphi) \quad (5.1.6)$$

де $I_0 = \frac{h}{m_0c}$ - комптонівська довжина хвилі частинки з масою m

($\lambda_0 = 2,43 \cdot 10^{-13} \text{ м}$).

Тиск світла. Серед різних дій світла на об'єкти довкілля існує механічна дія, що проявляється у тискові світла на поверхню тіла, яке його відбиває або поглинає. Величина цього тиску дуже мала. Наприклад, тиск на цілковито поглинаючу світло поверхню тіла становить $4,7 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м}^2$.

Теоретичне пояснення тиску світла можливо дати як на основі хвильової, так і квантової теорії світла і отримати тотожний результат:

$$p = \frac{W}{c}(1 + r), \quad (5.1.7)$$

де p – тиск світла; W – кількість світлової енергії, яка припадає на одиницю поверхні тіла за одиницю часу; r – коефіцієнт відбиття світла; c – швидкість світла.

Хімічна дія світла. Поглинання світлової енергії може спричинити у речовині різні хімічні процеси (фотохімічні реакції), серед яких найпоширенішими є асиміляція вуглекислого газу рослинами та розклад галоїдних солей срібла (фотографічний процес).

Головною характеристикою фотохімічних процесів є вихід фотохімічної реакції – відношення кількості речовини продукту реакції до кількості поглинутої світлової енергії.

Вихід фотохімічної реакції обернено пропорційний величині кванта світла, тобто його частоті (*фотохімічний закон Айнштайна*):

$$N = \frac{1}{h\nu}, \quad (5.1.8)$$

де N – число молекул, у яких відбувається перетворення за рахунок одиниці поглинутої променистої енергії частоти ν .

Задачі

Задача 5.1.1. Визначити відносну зміну частоти фотонів, які випромінюються збудженими ядрами атомів, при їхньому русі у полі тяжіння Землі з висоти 30 м до рівня моря.

Розв'язання. Енергія фотона дорівнює $W = mc^2 = h\nu$, звідки визначається маса фотона m :

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

Зміна повної енергії фотона спричинена зміною її потенціальної складової:

$$\Delta E = mgH = h\Delta\nu,$$

де H – висота розташування фотонів над рівнем моря на початку руху.

Використавши наведені співвідношення, маємо:

$$h\Delta\nu = \frac{h\nu}{c^2} \cdot gH;$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2} = \frac{9,8\text{ м/с}^2 \cdot 30\text{ м}}{9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2} = 3,27 \cdot 10^{-15}.$$

Задача 5.1.2. Яку теплову енергію за одиницю часу випромінює тверде тіло, якщо ступінь його чорноти k становить 0,3.

Розв'язання. За законом Стефана-Больцмана, теплова енергія, яку випромінює в 1 с одиниця поверхні не абсолютно чорного тіла, дорівнює:

$$E(T) = k\sigma T^4,$$

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

Отже, маємо:

$$E(T) = k\sigma T^4 = 0,3 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4} (273 + 36,6)^4 \text{ К}^4 = 0,16 \text{ кВт}.$$

Задача 5.1.3. Знайти тиск світла на стінки електричної 100-ватної лампи. Колба лампи має форму сфери радіусом 5 см. Стінки лампи відбивають 10% падаючого на них світла. Вважати, що 7% споживаної потужності витрачається на нагрівання.

Розв'язання. Тиск світла на будь-яку поверхню визначаємо за формулою:

$$p = \frac{W}{c}(1 + \rho),$$

де W – кількість світлової енергії, яка припадає на одиницю поверхні за одиницю часу; ρ – коефіцієнт відбиття поверхні; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість поширення світла у вакуумі.

За умовами задачі $N_c = \eta N$, де N – потужність лампи; N_c – потужність її світлового потоку; η – к.к.д. лампи.

Величину W визначаємо за формулою:

$$W = \frac{N}{S} = \frac{N}{4\pi R^2},$$

де R – радіус колби.

Остаточо маємо:

$$p = \frac{\eta N}{4\pi c R^2}(1 + \rho) = \frac{0,93 \cdot 100 \text{ Вт}}{12,56 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot (0,005 \text{ м})^2}(1 + 0,1) = 1,09 \cdot 10^{-5} \text{ Па.}$$

Тема 5.2. Фотоелектричний ефект

Опрацювати такі питання лекційного матеріалу:

- зовнішній фотоелектричний ефект;
- внутрішній фотоелектричний ефект.

Фотоелектричний ефект – емісія електронів із речовини під дією електромагнітного випромінювання (*зовнішній фотоелектричний ефект*); емісія електронів із окремих атомів газу при поглинанні ними світла (*фотоіонізація*); перехід електронів під дією світла із валентної зони у зону провідності у напівпровідниках або через межу метал-напівпровідник під дією світла з утворенням електрорушійної сили (*вентильний фотоелектричний ефект*).

Зовнішній фотоелектричний ефект є сукупністю трьох процесів: поглинання фотона електроном, рух електрона з надлишковою енергією до поверхні тіла, подолання електроном потенціального бар'єра та вихід за межі тіла.

Закони зовнішнього фотоелектричного ефекту, визначені експериментально і з'ясовані на основі квантової природи світла, наголошують:

1) кількість електронів, звільнених світлом за одиницю часу (*фотострум*), пропорційна інтенсивності випромінювання;

2) максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно зростає з частотою випромінювання і не залежить від освітленості.

Рівняння Айнштейна для фотоелектричного ефекту є відображенням закону збереження енергії для цього явища. За квантовими уявленнями фотон частоти ν володіє енергією $h\nu$, яку він передає електронів речовини. Останній, за умови, що вектор його швидкості спрямований у бік поверхні тіла, втрачає частину енергії на подолання потенціального бар'єра, тобто роботи проти сил зв'язку, які утримують електрон у межах тіла – *роботи виходу*. Вона різна для різних речовин. Решта енергії електрона, який здійснив “еміграцію” із речовини, проявляє себе як його кінетична енергія. За таких обставин складено формулу енергетичного балансу (рівняння Айнштейна для фотоелектричного ефекту):

$$h\nu = A + \frac{m u_{\text{макс}}^2}{2}, \quad (5.2.1)$$

де A – робота виходу; m – маса електрона; $u_{\text{макс}}$ – найбільша швидкість електрона, який здійснив емісію із речовини.

Рівняння (5.2.1.) засвідчує, що існує найменша частота ν_0 , за якої можливо спостерігати явище фотоелектричного ефекту для певної речовини. Її називають *червоною границею фотоелектричного ефекту*:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}. \quad (5.2.2)$$

Внутрішній фотоелектричний ефект. Сутність внутрішнього фотоелектричного ефекту тотожна зовнішньому, однак при освітленні напівпровідника чи діелектрика електрони залишаються у межах освітленого тіла. При поглинанні тілом енергії фотона, достатньої для подолання ширини

забороненої зони, електрон переходить із зони валентності у зону провідності. Унаслідок цього виникає пара носіїв струму – електрон і дірка, збільшується електропровідність тіла.

У речовинах із домішками під дією світла електрони можуть переходити із валентної зони на домішкові рівні або з домішкових рівнів у зону провідності. Відповідно виникає діркова або електронна провідність.

Особливим випадком внутрішнього фотоелектру є вентильний фотоелектр. Якщо на межу метал–напівпровідник (або двох напівпровідників з p і n провідністю) надходить світло, то електрони за певної енергії фотонів можуть долати цю межу, утворюючи *фотоелектрорушійну силу*.

У розглянутих явищах фотоелектру електрон опроміненого світлом тіла отримує енергію від одного фотона. За умови збільшення потужності джерел світла (наприклад, у випадку лазерів) може здійснюватись *багатофотонний фотоелектр*, коли електрон отримує енергію від декількох фотонів. У цьому випадку рівняння (5.2.1) набуває такого вигляду:

$$N h \nu = A + \frac{m u_{\max}^2}{2}, \quad (5.2.3)$$

де N – кількість фотонів ($N = 2, 3, 4, 5$).

Червона межа фотоелектру за його багатофотонного варіанту зміщується у бік довших хвиль (ν_0 зменшується у N разів).

Задачі

Задача 5.2.1. Фотоелектрони вибиваються з поверхні металу світлом частотою $1,2 \cdot 10^{15}$ Гц і затримуються потенціалом 3,15 В, а якщо довжина хвилі падаючого світла дорівнює 125 нм – потенціалом 8,1 В. Знайти постійну Планка.

Розв'язання. За рівнянням Айнштейна (5.2.1) маємо:

$$h \nu_1 = A + \frac{m u_{1\max}^2}{2}; \quad h \nu_2 = A + \frac{m u_{2\max}^2}{2}.$$

Оскільки

$$\frac{m u_{1\max}^2}{2} = e U_1 \quad \text{і} \quad \frac{m u_{2\max}^2}{2} = e U_2,$$

то

$$h \nu_1 = A + e U_1, \quad h \nu_2 = A + e U_2,$$

звідки

$$h(\nu_1 - \nu_2) = e(U_1 - U_2).$$

Оскільки $\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2}$, то

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{\nu_1 - \frac{c}{\lambda_2}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot (3,15 - 8,1) \text{ В}}{1,2 \cdot 10^{15} \text{ Гц} - \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{125 \cdot 10^{-9} \text{ м}}} = 6,6 \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Задача 5.2.2. Фотострум, що виникає в колі фотоелемента при опромінюванні електрода з цезію (робота виходу $e\phi = 1,9$ еВ) світлом з довжиною хвилі $\lambda = 2000 \text{ \AA}$, припиняється при вмиканні затримуючої напруги $U = 2$ В. Визначити величину контактної різниці потенціалів і роботу виходу другого електрода.

Розв'язання. Припинення струму в колі фотоелемента означає, що швидкість фотоелектронів при підході до другого електрода дорівнює нулю. Як впливає з закону збереження енергії, кінетична енергія електрона біля другого електрода дорівнює:

$$E_{k2} = 2h\nu - e\phi - eU_k - eU,$$

де $h\nu - e\phi_1$ – максимальна кінетична енергія електрона в момент виходу з першого електрода; U – затримуюча різниця потенціалів; $-e$ – заряд електрона; $e > 0$. Якщо в рівнянні $U_k > 0$, то це означає, що електрон гальмується контактною різницею потенціалів, а при $U_k < 0$ – прискорюється нею, тобто при $U_k > 0$ $\phi_1 < \phi_2$, а при $U_k < 0$ $\phi_1 > \phi_2$ ($e\phi_2$ – робота виходу з другого електрода).

Підставляючи в рівняння $E_{k2} = 0$, знаходимо контактну різницю потенціалів:

$$U_k = \frac{h\omega}{e} - \phi_1 - U; \quad U_k = 2,31 \text{ В.}$$

Отже, $U_k > 0$, тому $\phi_2 - \phi_1 = 2,31 \text{ В}$, звідки $\phi_2 = 4,21 \text{ В}$.

Задача 5.2.3. Для калію червона межа фотоелектру $\lambda_{\max} = 0,62 \text{ мкм}$. Яку максимальну швидкість u можуть мати фотоелектрони, що вилітають при опроміненні калію фіолетовим світлом з довжиною хвилі $\lambda = 0,42 \text{ мкм}$?

Розв'язання. Робота виходу A для калію дорівнює мінімальній енергії фотона, що спричиняє фотоелектр:

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

Відповідно до рівняння Айнштейна для фотоелектру

$$h\nu = A + \frac{mu^2}{2}, \text{ звідки:}$$

$$u = \sqrt{\frac{2hc(\lambda_{\max} - \lambda)}{m\lambda\lambda_{\max}}} = 5,8 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Тема 5.3. Елементи атомної фізики

Опрацювати такі питання лекційного матеріалу:

- розвиток поглядів на будову атома;
- закономірності в атомних спектрах водню;
- ядерна модель атома;
- теорія будови атома за Бором;
- постулати Бора;
- рівні енергії в атомі;
- гіпотеза де Бройля;
- хвильові властивості частинок;
- поняття про квантову механіку;
- квантові числа;
- принципи Паулі, співвідношення невизначеностей;
- періодична система елементів.

Розвиток поглядів на будову атома. Атом є найдрібнішою частинкою хімічного елемента. Уявлення про нього як неподільну “цеглинку світобудови”, із якої складається речовина, ввели древні греки, і таке представлення проіснувало майже до кінця ХІХ століття. Подальший розвиток науки довів, що атоми є досить складними утвореннями із простіших частинок, при цьому атомам притаманна суттєва стійкість. За сучасними уявленнями атоми складаються із малого порівняно з їхніми розмірами (порядку 10^{-10} м) позитивно зарядженого ядра, у якому зосереджена ледь частка маси атома, і певної кількості негативно заряджених частинок (*електронів*), чий заряд компенсує позитивний заряд ядра, а маса майже у 2000 разів менша від маси ядра. Електрони обертаються навколо ядра на різних орбітах. При взаємодії між собою атоми можуть обмінюватись електронами, утворюючи *позитивні* та *негативні йони*. Йони зберігають основні властивості атомів, з яких вони утворились, легко знову стають нейтральними атомами, приєднуючи або втрачаючи відповідну кількість електронів.

Стосовно ядра атома з'ясовано, що воно складається із ядерних частинок – *нуклонів*. Існують позитивно заряджені нуклони – *протони* та нейтральні – *нейтрони*. Кількість протонів (*протонне число*) визначає порядковий номер хімічного елемента у таблиці Менделєєва, а кількість нуклонів (*нуклонне число*) визначає його масу. Стійкість ядра забезпечують сили взаємодії між нуклонами (*ядерні сили*), які на багато порядків перевищують інші відомі у природі сили.

Закономірності в атомних спектрах Гідрогену. Збуджені атоми газу випромінюють сукупності спектральних ліній, кожній із яких відповідає певна частота. Сукупності є специфічними для різних хімічних елементів. Досліджуючи випромінювання Гідрогену на видимій ділянці спектра, Бальмер отримав формулу, яка визначає частоту окремих ліній:

$$\nu = Rc \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (5.3.1)$$

де $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – стала Рідберга; c – швидкість світла у вакуумі; m – цілі числа натурального ряду 3,4,5...

Лінії з частотами, визначеними за формулою (5.3.1.), утворюють серію, яка отримала ім'я *Бальмера*. У подальшому було з'ясовано, що у спектрі Гідрогену є загалом ще 5 серій, частоти яких визначає узагальнена щодо формули (5.3.1.) формула:

$$\nu = Rc \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (5.3.2)$$

де n і m – цілі числа, $m \geq n + 1$.

При:
 $n = 1, m = 2,3,4$ – *серія Лаймана*;
 $n = 3, m = 4,5,6$ – *серія Пашена*;
 $n = 4, m = 5,6,7$ – *серія Брекета*;
 $n = 5, m = 6,7,8$ – *серія Пфунда*;
 $n = 6, m = 7,8,9$ – *серія Хамфрі*.

Ядерна модель атома. Досліджуючи будову атома, Резерфорд здійснював його бомбардування α -частинками. Спостерігаючи розсіяння цих частинок при проходженні через тонкі шари речовини, зробив висновки, що:

- атом репрезентує нейтральну електричну систему, яка складається із позитивно зарядженого ядра і рівного за величиною зарядові ядра сумарного заряду негативно заряджених електронів;
- майже вся маса атома сконцентрована у малому (порівняно з розмірами атома) ядрі;
- кратність заряду ядра певного хімічного елемента щодо заряду електрона є порядковим номером цього елемента у таблиці Менделєєва;
- електрони рухаються навколо ядра, як планети навколо Сонця під дією кулонівських сил.

Виходячи із таких стверджень, Резерфорд отримав формулу для розрахунку часток розсіяних під різними кутами α -частинок, використання якої дало результати, підтвержені експериментально.

Запропонована модель атома базувалась на уявленнях класичної фізики, проте за цими уявленнями (електродинаміка Максвелла) електрон, рухаючись прискорено навколо ядра, мусив

губити свою енергію і врешті-решт впасти на ядро (що не спостерігається). Це протиріччя розв'язати у межах класичної фізики неможливо. Необхідні були нові уявлення, відмінні від класичних, і перший крок у цьому напрямі зробив Бор.

Теорія побудови атома за Бором. Борівська модель атома Гідрогену стверджує, що електрон тривало рухається навколо ядра по коловій орбіті, не змінюючи своєї енергії, за умови, що існує множина дозволених (а не всіх можливих) для його визначення орбіт. Орбіта буде дозволеною, якщо виконується квантова умова, а саме: момент кількості руху електрона відносно ядра мусить бути цілим кратним величини $\frac{h}{2\pi}$ (h – стала Планка). Якщо ввести позначення: m – маса електрона, u – його швидкість, r – радіус орбіти, то квантову умову запишемо так:

$$m u r = n \frac{h}{2\pi}, \quad (5.3.3)$$

де n – ціле додатне число ($n = 1,2,3,\dots$), яке називають *квантовим числом* певної дозволеної орбіти.

Дещо не зрозуміла на перший погляд умова (5.3.3), після відкриття хвильових властивостей електрона (про це нижче у цій частині), стає зрозумілішою як умова утворення на орбіті *стоячої хвилі*.

Значення радіусів квантованих орбіт визначимо, використавши умову зрівноважування сили кулонівської взаємодії між ядром і електроном (їхні заряди рівні, e – заряд електрона) та відцентрової (рух по колу):

$$\frac{m u^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (5.3.4)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2$ – електрична стала.

Виключаючи u із рівнянь (5.3.3) і (5.3.4), знаходимо:

$$r = r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}. \quad (5.3.5)$$

Введемо нову сталу $a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$, тоді:

$$r_n = n^2 a_0. \quad (5.3.6)$$

Зі співвідношення (5.3.6.) маємо, що у борівській моделі атома Гідрогену радіуси дозволених колових орбіт є дискретними величинами: $a_0, 4a_0, 9a_0, 16a_0, \dots$, де a_0 найменший дозволений радіус ($a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ м). Коли електрон перебуває на орбіті радіуса a_0 , він має найменшу повну енергію і знаходиться в основному стані. Підрахуємо цю енергію, як і енергію інших борівських орбіт.

Повна енергія є сумою кінетичної енергії $E_{кин}$ і потенціальної $E_{пот}$, при цьому:

$$E_{кин} = \frac{m u^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}, \quad (5.3.7)$$

а

$$E_{пот} = C - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n},$$

де C – деяка довільна стала, яку для $r_n \rightarrow \infty$ приймають рівною нулю. Отже, повна енергія на орбіті з квантовим числом n дорівнює:

$$W_n = E_{кин} + E_{пот} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 n^2 a_0}. \quad (5.3.9)$$

Коли електрон рухається по орбіті з квантовим числом n , маючи незмінну енергію W_n , атом Гідрогену є у *стаціонарному стані*. Стаціонарний стан, який відповідає найнижчій внутрішній орбіті ($n = 1$) та визначається найменшою енергією W_1 , називають

нормальним. Якщо ж атому ззовні будь-яким способом надали енергію, то він може перейти в один зі стаціонарних станів з більшою енергією. Такий стан, на відміну від нормального, називають *збудженим*. При переході зі стаціонарного стану з енергією W_k у стаціонарний стан з енергією W_n , атом випромінює ($W_k > W_n$), або поглинає ($W_k < W_n$) фотон, енергія якого дорівнює:

$$h\nu = W_k - W_n. \quad (5.3.10)$$

Рівняння (5.3.10) називають *умовою частот Бора*. За його допомогою визначено теоретично формулу розташування спектральних ліній (5.3.2), отриману емпіричним шляхом.

Постулати Бора. При побудові моделі атома Гідрогену вчений Бор зробив декілька припущень, які на той час не мали експериментального підґрунтя, а також суперечили електродинаміці Максвелла та механіці Ньютона. Сміливість припущень виправдовувалась тим, що запропонована модель дозволяла пояснити деякі властивості атомних систем, зокрема спектр атома Гідрогену. Припущення отримали назву постулатів. Їх три.

Перший постулат Бора: з усіх можливих орбіт руху електрона дозволеними є лише ті, для яких виконується квантова умова (5.3.3).

Другий постулат Бора: коли електрон перебуває на одній із дозволених орбіт, він, рухаючись, не випромінює енергії.

Третій постулат Бора: електрон випромінює або поглинає енергію, величину якої визначає умова частот (5.3.10), тільки при переході із однієї дозволеної орбіти на іншу, також дозволена.

Рівні енергії в атомі. Оскільки випромінювання і поглинання енергії атомом можливе лише порціями, то і самі її запаси на орбіті можуть бути такими, що утворюють дискретний ряд значень.

Цей наслідок борівських постулатів знайшов підтвердження в експериментах Франка і Герца. Досліджуючи величину струму (залежно від прикладеної напруги) у колі з трубкою, заповненою розрідженими парами ртуті, дослідники спостерігали його максимум при напругах 4,9; 9,8; 14,7 тощо (значення у вольтах).

Пояснюється це так. Якщо, справді, за Бором в атомі існують стаціонарні стани, яким притаманні певні значення енергії (E_1, E_2, E_3, \dots – енергія 1-го, 2-го, 3-го тощо стаціонарних станів) і атоми можуть поглинати лише ті порції енергії від зовнішнього джерела, які відповідають різниці між енергіями стаціонарних рівнів, то електрони із підігрітого катода трубки (*явище термоелектронної емісії*) під дією прикладеної напруги рухаються через пару ртуті, маючи швидкості, які відповідають цій напрузі. Доки енергія електронів менша, ніж $\Delta E_1 = E_2 - E_1$, вони зазнають пружних ударів з Нг-ядрами (тобто не гублячи свою енергію) і струм у колі зростає. При напрузі, за якої електрон досягне енергії ΔE_1 , відбувається його непружний удар з ядром, тобто він передасть цю енергію атому Меркурію і до анода не долетить. Струм у колі спаде. Атом Меркурію, який отримав енергію ΔE_1 , переходить у збуджений стан з енергією E_2 , з якого повертається за час порядку 10^{-8} с в основний, випромінюючи фотон з енергією ΔE_1 . При збільшенні напруги у колі знов розпочнеться зростання струму, який сягне максимуму при значенні її 9,8 В, що відповідає енергії 3-го стаціонарного стану. У подальшому повторюється вище описана ситуація.

Отже, у дослідах Франка і Герца безпосередньо виявлено: атоми володіють енергетичними рівнями.

У спектроскопії частоти спектральних ліній прийнято представляти як різниці *термів*:

$$v_{nm} = T(m) - T(n), \quad (5.3.11)$$

де $T(n) = \frac{R}{n^2}$; $T(m) = \frac{R}{m^2}$ (позначення відповідають формулі (5.3.2)).

Оскільки, за постулатом Бора $v_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$, то

$T(n) = -\frac{E_n}{h}$ і, отже, терм тісно пов'язаний з енергією стаціонарного стану атома.

Гіпотеза де Бройля. Основа гіпотези де Бройля – всім фізичним об'єктам, незалежно від того, якого вони типу –

хвильового чи корпускулярного, притаманна певна довжина хвилі, пов'язана з їхнім імпульсом тотожнім чином:

$$\lambda = \frac{h}{mu}. \quad (5.3.12)$$

Це уявлення виникло у де Бройля як поширення дуалістичної природи (хвиля-частинка) фотона на електрон, а згодом – і на інші елементи матерії. Через декілька років це блискуче підтвердили експерименти Девісона і Джермера, які відкрили явище дифракції електронів.

На підставі своєї гіпотези де Бройль з'ясував зміст квантової умови Бора щодо дозволених орбіт у системі Гідрогену. Такими орбітами вважають ті, на яких виконуються умови існування стоячих хвиль (на довжині орбіти повинно міститись ціле число довжин хвиль):

$$n\lambda = 2\pi r. \quad (5.3.13)$$

Якщо $\lambda = \frac{h}{p}$, то $\frac{nh}{p} = 2\pi r$ або $pr = \frac{nh}{2\pi}$, тобто отримуємо умову квантування орбіт за Бором.

Хвильові властивості частинок. Окрім отриманої експериментально дифракції електронів Штерн і Естерман дослідно довели, що дифрагують нейтральні атоми і молекули (He і H₂), довжина хвилі яких визначається формулою (5.3.12), якщо для величини m використати маси He і H₂.

За сучасними уявленнями кожна матеріальна частинка має хвильові властивості. Однак якщо для електрона, атома, молекули, інших частинок мікросвіту їхня довжина хвилі порядку 10^{-10} , то для кульки масою в 1 г, яка рухається зі швидкістю 1 см/с, вона становить $6,5 \cdot 10^{-29}$ м. Отже, довжина хвилі у мікрочастинок є порівняна з їхніми розмірами, і їхні хвильові властивості при взаємодії з речовиною помітні, а макрочастинок є величезними щодо їхніх довжин хвиль, отож помітити у них хвильові властивості неможливо.

На відміну від макросвіту, в якому ми існуємо і маємо певні наочні уявлення про його об'єкти, мікрочастинки наочно уявити собі неможливо. Поєднуючи у собі властивості частинки і хвилі, мікрооб'єкти не ведуть себе ні як хвиля ні як частинка.

Мікрооб'єктам не властиві визначені водночас координата та імпульс, отож втрачає сенс поняття їхньої траєкторії. Не варто вважати, що існує певна локалізація мікрочастинки, як і не варто зображати їх якоюсь наочною фізичною моделлю.

Поняття про квантову механіку. Сукупність законів руху частинок речовини з урахуванням їхніх хвильових властивостей називають *хвильовою* або *квантовою механікою*. Існує декілька квантово-механічних підходів до опису об'єктів мікросвіту (варіантів квантової механіки), які різняться застосованим математичним апаратом, хоча приводять до тотожних результатів, які відповідають експериментальній інформації. Зупинимось на хвильовому варіанті, запропонованому Шредингером.

Базуючись на уявленнях де Бройля про хвильові властивості речовини, Шредингер отримав *хвильове рівняння* (нині носить його ім'я), яке є основним рівнянням квантової механіки і відіграє у мікросвіті ту ж роль, що й рівняння руху Ньютона у макросвіті. Хоча фундаментальне хвильове рівняння Шредингера було згодом перетворене Діраком, його значення збереглося до наших часів, а рішення добре відповідають відомим даним про світ мікрочастинок.

Шредингер виразив рух мікрочастинки через комплексну функцію координат і часу, яку він називав *хвильовою функцією*, і позначив грецькою літерою ψ (пси-функція). Пси-функція характеризує стан мікрочастинки у просторі і часі, тобто її аргументами є x, y, z і t : $\psi(x, y, z, t)$. Її описують рівнянням *плоскої хвилі*:

$$\psi(x, y, z, t) = \psi_0 e^{-2\pi i \left(\nu t - \frac{x}{\lambda} \right)}, \quad (5.3.14)$$

де ψ_0 – амплітуда хвильової функції; i – уявна одиниця; ν, λ – частота і довжина хвилі; x – напрям розповсюдження хвилі.

Квадрат хвильової функції характеризує *густину ймовірності* (ймовірність, віднесена до одиниці об'єму). Частинка з більшою ймовірністю буде у тому місці, де її хвильова функція велика, а з меншою – де хвильова функція мала. Із такої інтерпретації пси-функції випливає, що квантова механіка має статистичний характер.

Рівняння для пси-функції (рівняння Шредингера) має вигляд:

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \nabla^2 \psi + U\psi = \frac{i\hbar}{2\pi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (5.3.15)$$

де m – маса частинки; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа;

U – функція координат і часу, градієнт якої, взятий з оберненим знаком, визначає силу, яка діє на частинку; коли функція не залежить явно від часу, вона має сенс потенціальної енергії частинки.

У теорії диференціальних рівнянь, до яких належить рівняння (5.3.15), доводиться, що їх рішення існують не за будь-яких значень параметра (у випадку рівняння Шредингера параметром є повна енергія частинки), а лише деяких вибраних. Отже, квантування енергії отримують із основних положень квантової механіки без будь-яких додаткових припущень.

Квантові числа. У борівській моделі атома електрони рухаються по колових орбітах. Зомерфельд запропонував врахувати ще і можливість їхнього руху по орбітах еліптичних, які виникають як наслідок взаємодії між електронами атома. Енергії електронів, що рухаються по орбітах різної форми і відповідають тому самому значенню квантового числа n (*головного квантового числа*), ледь відрізняється. Цю різницю враховують за допомогою *азимутального квантового числа* l , яке набуває послідовних значень цілих чисел від 0 до $n-1$ ($l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$).

Третє квантове число m_l відображає вплив, який може здійснити на стаціонарний стан зовнішнє магнітне поле. Це число

отримало назву *магнітного квантового числа* і може набувати послідовних значень цілих чисел від -1 до +1 ($m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

Введення трьох квантових чисел дає змогу задовільно пояснити експериментально встановлене *розщеплення енергетичних рівнів у атомі*.

Введено наступне позначення енергетичних рівнів: електрон, який перебуває у стані з головним квантовим числом n і азимутальним $l = 0$ позначають літерою s , записується як ns ($1s, 2s, 3s, \dots$). Для стану з $l = 1$ позначення буде np , для $l = 2$ маємо позначення nd , при $l = 3 - nf$, потім ідуть позначення літерами d, h тощо.

Оскільки l завжди менше n (l не більше $n-1$), в електрона можливими є стани:

1s
2s, 2p
3s, 3p, 3d
4s, 4p, 4d, 4f

тощо.

Все було гаразд, доки Зеєман не виявив (*аномальний ефект Зеємана*), що іноді спостерігають подвоєння розщеплених рівнів. Це вказувало на необхідність введення ще одного квантового числа, яке може приймати тільки два значення.

Гаудсміт і Уленбек висунули гіпотезу, що електрон володіє деякою властивістю (подібно до його заряду чи маси), яку у макросвіті уявити неможливо, проте маємо змогу врахувати її вплив введенням четвертого квантового числа. Число отримало назву *спінового квантового числа* m_s , яке для випадку електрона набуває двох значень: $+\frac{1}{2}$ і $-\frac{1}{2}$.

Принцип Паулі. Співвідношення невизначеностей. У нормальному (незбудженому) стані атома електрони повинні розташовуватися на найнижчих енергетичних рівнях, які вони в змозі зайняти аналогічно тому, як кожне тіло на Землі займає досяжне для нього найнижче положення. За таких обставин здавалося б, що всі електрони в атомі з нормальним станом перебуватимуть у стані $1s$. Подібна ситуація дійсно спостерігається в атомах Гідрогену та Гелію, а у інших – ні. У Н-атома один

електрон, і він у стані $1s$, у He-атома 2 електрони, вони також у стані $1s$. В атома Літію 3 електрони, проте лише 2 з них перебувають у стані $1s$, для третього стан $1s$ є недосяжним. Аналогічну картину спостерігаємо і в інших багатоелектронних атомів. Цю ситуацію відображено в одному із законів квантової механіки, який називають *принципом Паулі*: у квантовій системі (атомі, зокрема) не може бути двох електронів, в яких однакова сукупність усіх чотирьох квантових чисел.

Кожному із n значень квантового числа l відповідають $2l+1$ значень квантового числа m_l . Отже, число різних станів, які відповідають певному n , дорівнює:

$$\sum_{l=0}^{n-1} (2l+1) = n^2 \quad (5.3.16)$$

Якщо врахувати два можливих значення квантового числа m_s , то у стані з певним значенням головного квантового числа n в атомі мають змогу перебувати не більше, ніж $2n^2$ електронів:

$n=1$ – до 2-х електронів
 $n=2$ – до 8-ми електронів
 $n=3$ – до 18-ти електронів
 $n=4$ – до 32-х електронів
 $n=5$ – до 50-ти електронів

тощо.

Співвідношення невизначеностей. Проаналізувавши чималу кількість експериментів, Гайзенберг сформулював принцип, який стверджує, що результатом вимірів координати та імпульсу, вимірів енергії у фіксований момент часу є невизначеність, яка завжди не менша постійної Планка:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}, \quad (5.3.17)$$

де Δx і Δp – невизначеності значень положення частинки та її імпульсу.

Принцип невизначеності став важливим кроком в інтерпретації закономірностей мікросвіту і побудові квантової механіки. Відображенням цих закономірностей є, наприклад, той

факт, що результати експерименту з визначення координат частинки мають імовірнісний характер.

Періодична система елементів. Відкриття хімічних елементів стимулювало активний пошук закономірностей у їхніх властивостях. Доведено, що кожному елементові відповідає певний атом з певним набором властивостей. Встановлено також, що хімічні елементи утворюють відповідні сім'ї: метали, гази тощо. Виявлено одну з найважливіших закономірностей серед хімічних елементів – періодичність їхніх фізичних і хімічних властивостей, періодичність їхніх сполук.

Менделєєву (паралельно цією проблемою займався Майєр), розташовуючи відомі тоді елементи за порядком зростання їхніх мас, вдалось створити *таблицю хімічних елементів*, у якій чітко простежується періодичність деяких їхніх властивостей. Таблиця отримала назву “Періодична система хімічних елементів Д. І. Менделєєва”. На її базі передбачено існування деяких, ще не відкритих на той час, елементів. Пізніше Мозлі з'ясував, що таблицю доцільніше будувати не за величинами *атомних мас*, а за *атомними номерами*, які за сучасними уявленнями відповідають числу електронів в атомі. Однак це принципово не змінило таблицю, оскільки зростання атомних мас відповідає зростанню їхніх атомних номерів.

Пояснити встановлену періодичну систему елементів маємо змогу на підставі квантово-механічних уявлень про будову атома.

За таких уявлень загальна електронна хмаринка навколо ядра розшаровується за енергетичною ознакою (головним квантовим числом) на певну кількість шарів. Позначення шарів: *K, L, M, N, O*, тощо при $n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ відповідно.

Відомо, що існує розщеплення енергетичних рівнів залежно від азимутального квантового числа (s, p, d, f, \dots стани). Відповідно до цих станів відбувається поділ кожного шару на *s*-оболонки, *p*-оболонки тощо. Користуючись викладеним, побудуємо систему хімічних елементів.

У першого елемента – Гідрогену заряд ядра дорівнює одиниці, отож *1s* – електрон з довільною орієнтацією *спіна*. Отже, його єдиний *K*-шар не цілком заповнено (існує одна вакансія для *1s* – електрона з протилежним спіном).

Якщо заряд ядра збільшити на одиницю (відповідно, додати один електрон в електронну хмаринку навколо ядра), то *K*-шар буде заповнено двома *1s*-оболонками по одному електрону з протилежними спінами. Маємо 2-й елемент системи – Гелій.

Подальше збільшення заряду ядра на одиницю відповідає 3-му елементові таблиці – Літію. Його два електрони заповняють *K*-шар, а третьому доведеться розташуватись на *s*-оболонці *L*-шару (найнижчий із незайнятих енергетичних рівнів). У четвертого елемента, Берилію, 4 електрони цілком заповнюють *K*-шар і *s*-оболонку *L*-шару.

Діючи за аналогією, маємо змогу побудувати всю систему елементів і, порівнюючи з реальною таблицею Менделєєва, упевнитись у їхній тотожності, з'ясувати структуру систем хімічних елементів – існування періодів і груп, та деякі інші властивості:

1. *Стійкість хімічних елементів*, спричинена стійкістю їхніх ядер, йонізація, утворення складних молекул обмежені перегрупуванням зовнішніх електронів і не зачіпають атомних ядер.

2. *Періодичність хімічних властивостей елементів* спричинена кількістю електронів на зовнішніх оболонках в атомі, яка періодично повторюється відповідно до того, як заповнюються шари *K, L* тощо.

3. *Хімічні властивості атома* визначаються будовою його електронних оболонок, тобто, врешті-решт, зарядом атомного ядра. Отож елементи у періодичній системі розташовані у порядку зростання ядерного заряду.

4. *Номер групи* у системі Менделєєва дорівнює числу елементів на останній із зайнятих електронних оболонок атома.

5. Хімічні властивості атомів визначають електрони, розташовані на останній, не цілком зайнятій електронній оболонці. Ці електрони називають валентними, їхнє число вказує на *валентність елемента*.

Задачі

Задача 5.3.1. Знайти радіуси перших трьох борівських орбіт у атомі Гідрогену та швидкості руху електронів на них.

Розв'язання. При русі електрона навколо ядра між ними діє кулонівська сила, що проявляє себе щодо електрона як доцентрова:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m u_n^2}{r_n},$$

де e – заряди електрона та атома Гідрогену; r_n – радіус n -ої орбіти; ϵ_0 – електрична стала; m – маса електрона; u_n – швидкість електрона на n -й орбіті.

За першим постулатом Бора дозволеними для руху електрона є лише ті, щодо яких справедливе співвідношення:

$$m r_n u_n = n \frac{h}{2\pi},$$

де h – стала Планка; n – головне квантове число.

Використавши приведені співвідношення, отримаємо:

$$r_n = \frac{h^2 n^2 r_0}{\pi m e^2} = a_0 n^2, \text{ де } a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \text{ – борівський радіус,}$$

$$a_0 = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot (6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с})^2}{3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Кг} (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2} = 5,29 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Отже: $r_1 = a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}; \quad r_2 = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ м};$
 $r_3 = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$

Для визначення величини швидкості використовуємо вираз:

$$u_n = \frac{nh}{2\pi m r_n}.$$

Підставивши у цей вираз значення радіусів орбіт, отримаємо:

$$u_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}.$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$u_1 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}; \quad u_2 = 1,1 \cdot 10^6 \text{ м/с}; \quad u_3 = 7,3 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Задача 5.3.2. Визначити типову натуральну ширину енергетичних рівнів атомної системи.

Розв'язання. Розкид значень енергії, який утворює ширину енергетичних рівнів, можливо оцінити, використавши співвідношення невизначеностей Гайзенберга, зокрема невизначеність при одночасному вимірюванні енергії і часу:

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

Час переходу квантової системи із одного енергетичного рівня в інший приблизно 10^{-8} с . Отож розкид значень енергії цього рівня становить:

$$\Delta E \approx \frac{h}{\Delta t} \approx \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{10^{-8} \text{ с}} \approx 6,6 \cdot 10^{-26} \text{ Дж} \approx 4 \cdot 10^{-7} \text{ еВ.}$$

Задача 5.3.3. Який хімічний елемент отримаємо, якщо в атомі будуть цілковито заповнені всі стаціонарні стани з головним квантовим числом $n = 2$?

Розв'язання. У стані з $n = 1$ можливе лише одне значення азимутального квантового числа $l = 0$ (l не може бути більшим від $n - 1$). У цьому стані можливе лише одне значення магнітного квантового числа m_l (m_l може набувати $(2l + 1)$ значення від $-l$ до $+l$). Спінове квантове число може набути лише два значення $m_s = \pm \frac{1}{2}$. Отже, у стані з $n = 1$ можливі значення $l = 0, m_l = 0, m_s = \pm \frac{1}{2}$, тобто у цьому стані існують два електрони.

У стані з $n = 2$ можливі значення: $l = 0, 1; m_l = -1, 0, +1, m_s = \pm \frac{1}{2}$, тобто:

$$n = 2, l = 0, m_l = 0, m_s = \pm \frac{1}{2} \text{ – два електрони;}$$

$$n = 2, l = 1; m_l = -1, 0, +1, m_s = \pm \frac{1}{2} \text{ – шість електронів.}$$

Отже, у стані з $n = 2$ може бути вісім електронів.

Усього в атомі з цілком заповненими оболонками аж до енергетичного рівня з $n = 2$ буде $2 + 8 = 10$ електронів. Таку конфігурацію електронів має інертний газ Неон.

Тема 5.4. Елементи фізики атомного ядра

Опрацювати такі питання лекційного матеріалу:

- природна радіоактивність;
- закони радіоактивного розпаду;
- способи спостереження і реєстрації заряджених частинок;
- відкриття нейтрона;
- будова атомного ядра;
- ядерні сили;
- ізотопи, ізобари, ізотони;
- альфа–розпад, правила зміщення;
- бета–розпад, нейтрон;
- гама–випромінювання, позитрон;
- дефект маси, енергія зв'язку і стійкість атомних ядер;
- поділ важких ядер;
- ланцюгова ядерна реакція;
- термоядерні реакції.

Природна радіоактивність. Уран, Торій, деякі інші важкі елементи неперервно і без будь-яких зовнішніх впливів є джерелом невидимого випромінювання, яке, подібно до рентгенівського, здатне проникати крізь непрозорі екрани і викликати фотографічні та йонізаційні ефекти. Властивість подібного самовільного випромінювання називають *радіоактивністю*, а елементи з цією властивістю – радіоактивними.

Радіоактивність існуючих у природі радіоактивних елементів називають природною, на відміну від штучної радіоактивності, яка може виникнути унаслідок різних ядерних реакцій.

Встановлено, що радіоактивне випромінювання складається із трьох компонентів – α -, β -, γ -випромінювань: α -випромінювання є потоком позитивно заряджених α -частинок (двічі йонізовані атоми Гелію); β -випромінювання – це потік негативно заряджених

β -частинок (електрони); γ -випромінювання – електронейтральна компонента, яка за своєю природою є електромагнітною хвилею з довжиною $10^{-11} - 13^{-10}$ м, тобто меншою, ніж у рентгенівських променів.

Закони радіоактивного розпаду. Коли ядро радіоактивного елемента випромінює α -частинку, змінюється його маса і заряд, і це змінює хімічну природу радіоактивного елемента. При випромінюванні β -частинок змінюється заряд ядра і знов-таки хімічна природа елемента.

Отже, випромінюючи α - і β -частинки, атоми радіоактивного елемента перетворюються в атоми нового елемента. У цьому сенсі вживають термін *радіоактивний розпад* (відповідно, α -розпад і β -розпад).

Радіоактивний розпад спричинює неперервне зменшення числа атомів радіоактивного елемента з різною швидкістю, яку характеризує активність.

Активність радіоактивного елемента є числом частинок, яке випромінюється за одиницю часу. Активність (із визначення) має розмірність c^{-1} , одиницею активності – у системі СІ є бекерель (Бк).

Інтервал часу, протягом якого розпадеться половина радіоактивних атомів, називають *періодом напіврозпаду*. Це стала величина, притаманна кожному радіоактивному елементові (радіонуклід), як і пов'язана з періодом напіврозпаду *стала розпаду* (величина імовірності розпаду ядра за одиницю часу).

Якщо N_0 – число нуклідів у початковий момент часу ($t = 0$); N – їхнє число у момент часу t ; λ – стала розпаду, то, як встановлено:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (5.4.1)$$

Співвідношення (5.4.1.) характеризує залежність кількості нуклідів, які не розпались, від часу. Його називають *законом радіоактивного розпаду*.

Зі співвідношення (5.4.1.) маємо:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (5.4.2)$$

i

$$A = \lambda N, \quad (5.4.3)$$

де $t_{1/2}$ – період напіврозпаду; A – активність.

Способи спостереження і реєстрації заряджених частинок. Найпростішим методом спостереження і реєстрації дії окремих заряджених частинок є *метод сцинтиляції*. При бомбардуванні деяких люмінофорів швидкими зарядженими частинками спостерігається їхнє гальмування з перетворенням енергії у видиме світло. При потраплянні зазначених частинок на шар люмінофора виникає спалах – сцинтиляція. Найпростіший приклад для спостереження спалахів – *спінтарископ*.

Інший спосіб спостереження і відповідної реєстрації заряджених частинок – дослідження результатів їхнього руху через газове середовище. Рухомою частинкою іонізує газ, розташований у колі електричного струму. Виникають імпульси струму, пропорційні кількості частинок, які спричинили іонізацію. Первісним приладом, який реалізував цей спосіб спостереження, був *лічильник Гайгера*, удосконалений Мюлером.

За допомогою *камери Вільсона* можливо спостерігати траєкторію руху заряджених частинок – *треки*. Камера заповнена перенасиченою водяною парою, у якій заряджені частинки, рухаючись, іонізують газ, а на йонах осідають краплинки вологи. Траєкторія частинки стає видимою і набуває вигляду туманного сліду.

Завдяки високій роздільній здатності за енергію, малому часу зростання сигналу детектування заряджених частинок нині широко застосовують твердотільні аналоги йонізаційних камер – *напівпровідникові детектори*. У детекторах використовується реєстрація та визначення параметрів заряджених частинок на засадах їхньої здатності утворювати у напівпровідниковому середовищі носіїв заряду – електрони та дірки.

У *бульбашкових камерах* для дослідження заряджених частинок використовують явище перегріву чистих рідин, у яких кипіння відбувається лише за наявності зовнішніх збуджувачів, наприклад, йонів, утворених зарядженою частинкою.

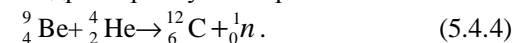
Широке застосування знайшов метод реєстрації ядерних випромінювань за допомогою спеціальних *фотоемульсій*.

Якщо заряджена частинка рухається у певному середовищі зі швидкістю, більшою за швидкість світла у цьому середовищі, то для її фіксації і визначення параметрів використовують *лічильники Черенкова*.

Існують також інші способи спостереження за зарядженими частинками, які реалізуються за допомогою *електретних, хімічних, калориметричних детекторів* тощо.

Відкриття нейтрона. Дуже важливим кроком у розумінні структури ядра було відкриття Чадвіком *нейтрона*. Це частинка такої ж приблизно маси, як і протон, але електронейтральна. Відсутність у нейтрона електричного заряду спричинює його велику проникливу здатність. Виявити нейтрони можливо тільки за вторинними ефектами, які вони спричинюють. Наприклад, зіткнувшись з ядром, нейтрони приводять його до руху. Виникають так звані *ядра віддачі*, які, рухаючись, створюють на своєму шляху значну кількість йонів, отож маємо змогу виявити їх детекторами заряджених частинок.

Вперше виявили нейтрони при опроміненні Берилію α -частинками. У цьому випадку відбувається ядерна реакція, унаслідок якої утворюється ядро Карбону і нейтрон:



Будова атомного ядра. Той факт, що нейтрони і протони можуть бути вибиті із ядра, засвідчує їхню присутність у кожному ядрі. Стосовно електронів і γ -променів встановлено, що їх у складі ядер немає. Вони народжуються при ядерних перетворюваннях подібно як фотони, які в атомі відсутні, утворюються при електронних переходах в атомі. Свідченням цього є маса елементів, яка майже точно становить ціле кратне маси Гідрогену.

В атомній фізиці за одиницю електричного заряду використовують заряд електрона, а *атомну одиницю маси* (а.о.м.) визначено, як 1/12 маси атома Карбону ($1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$). Маса найлегшого елемента – Гідрогену – дорівнює 1,008 а.о.м. За таких обставин заряд ядра Z дорівнює числу протонів у ядрі. Z

називають *протонним числом*. Маса атома A дорівнює числу *нуклонів* (протонів і нейтронів) у ядрі: цю величину називають *нуклонним числом*.

Ядерні сили. Оскільки складові ядра – нейтрони і протони – міцно утримуються у ньому, між нуклонами повинні діяти сили притягання. Ці сили мають бути достатньо великими, аби протидіяти силам електростатичного відштовхування протонів. Особливі сили, які виникають при зближенні нуклонів на малі відстані і зв'язують їх у ядрі, називають ядерними.

Ядерні сили є однаковими при взаємодії між парами нуклонів *протон-протон, нейтрон-протон, нейтрон-нейтрон*.

Характерною особливістю ядерних сил є їхня *короткодія*. При зближенні нуклонів на відстань порядку 10^{-15} м вони сягають великого значення, але при збільшенні відстані лише у декілька разів стають настільки мізерними, що ними можна нехтувати.

При зіткненні нуклонів проявляється “обмінний” характер ядерних сил: протон, в який потрапив нейтрон, зазнає незначної віддачі і перетворюється у нейтрон, а нуклон, який рухається вперед, із нейтрона перетворюється у протон.

Короткодія і величина ядерних сил засвідчує, що вони не подібні на електричні чи гравітаційні сили. Наприклад, електрична взаємодія на два порядки, тобто у 100 разів, менша, ніж ядерна, і з відстанню послаблюється плавно (обернено пропорційно квадрату відстані).

Доцільно очікувати, що аналогічно іншим взаємодіям (гравітаційній та електромагнітній), існує поле ядерних сил. Юкава зробив припущення, що подібно електромагнітному полю, якому притаманний потік електромагнітних квантів фотонів, існують кванти ядерного поля. При дослідженні космічних променів відкрито частинки, які назвали *пі-мезонами* (π) і які, згідно з подальшими дослідженнями, є квантами ядерного поля.

Існує три види пі-мезонів: позитивно заряджені π^+ , негативно заряджені π^- і нейтральні π^0 . Подібно тому, як фотони випромінюються при гальмуванні заряджених частинок, π -мезони випромінюються при гальмуванні (співзіткненнях) нуклонів.

Значимо, пі-мезони є нестабільними. Наприклад, нейтральний π -мезон через час порядку 10^{-16} с розпадається на два γ -кванти.

Слідом за π -мезонами було відкрито декілька видів ще дещо важчих і менше стабільних мезонів, які сильно взаємодіють з ядрами і які доцільно вважати квантами поля ядерних сил.

Ізотопи, ізобари, ізотони. Атомні ядра, сформовані із певної кількості нейтронів і протонів, можуть мати однакову кількість протонів і різну кількість нейтронів, тоді маємо справу з певним хімічним елементом (при однаковому протонному числі місце цих різновидів в одній клітинці таблиці Менделєєва) з різними масами (різними нуклонними числами). Такі різновиди хімічного елемента називають *ізотопами*. Здебільшого, хімічні елементи мають по кілька стабільних ізотопів: у Оксигену – 3, в Стануму – 10 тощо. У Гідрогену є три ізотопи: ${}^1_1\text{H}$ – звичайний Гідроген (*протій*), ${}^2_1\text{H}$ – важкий Гідроген (*дейтерій*) та ${}^3_1\text{H}$ – надважкий Гідроген (*тритій*).

Можливий випадок, коли ядра мають однакове нуклонне число, однак різні протонні, наприклад, ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ і ${}^{40}_{20}\text{Ca}$. Хімічні елементи за таких обставин називають *ізобарами*.

Існують елементи з однаковим числом нейтронів, які називають *ізотонами*.

Радіоактивні елементи з однаковими нуклонними та протонними числами, але з різними періодами напіврозпаду, називають *ізомерами*. Наприклад, у ${}^{80}_{35}\text{Br}$ є два ізомери з періодами напіврозпаду 18 хвилин і 4,4 години.

Альфа-розпад. Правило зміщення. Коли із ядра радіоактивного елемента вилітає α -частинка (α -розпад), вона забирає з собою відповідну масу і заряд. Оскільки α -частинка є двічі йонізованим атомом Гелію (${}^4_2\text{He}$), то маса ядра, з якого вона вилетіла (*материнське ядро*), буде на 4 одиниці більшою, а заряд – на 2 одиниці меншим. Отже, утвориться ядро (*дочірнє*) нового хімічного елемента. Розпад відбувається за такою схемою:



де X – хімічний символ материнського, а U – дочірнього ядра.

Кінетична енергія α -частинок, які вилітають із материнських ядер, є різною. Вона є більшою для тих материнських ядер, які розпадаються швидше.

Дочірнє ядро може утворитись як у нормальному, так і в збудженому стані. В останньому випадку це ядро, переходячи у нормальний стан, може випромінювати γ -квант або нуклон, електрон, α -частинку.

При α -розпаді спостерігається зміщення елемента з дочірнім ядром у таблиці Менделєєва на два номери у бік зменшення щодо елемента з материнським ядром. Це – *правило зміщення*.

Бета-розпад. Нейтрино. Існує три різновиди β -розпаду. За першого виду β -розпаду із материнського ядра вилітає електрон. Цей вид позначається β^- -розпад, його називають *електронним розпадом*.

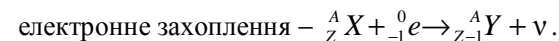
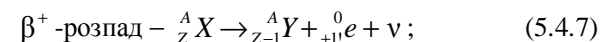
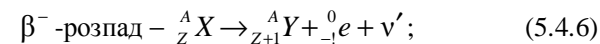
За другого виду β -розпаду із материнського ядра вилітає частинка, подібна до електрона, однак з позитивним електричним зарядом, яку називають *позитроном*. Такий розпад називають *позитронним* і позначають β^+ -розпад.

За третього виду β -розпаду, який називають *електронним захопленням*, в атомі відбувається перетворення: ядро поглинає один із K -електронів власної оболонки, унаслідок чого один із протонів ядра перетворюється у нейтрон. Утворене ядро може бути у збудженому стані і, переходячи у стан з меншою енергією, випромінює фотони. Місце в електронній оболонці, звільнене електроном, який захопило ядро, заповнюється електроном із далі розташованої від ядра оболонки з випромінюванням рентгенівських променів.

Детальніший аналіз процесів β -розпаду (зокрема, дотримання при розпаді законів збереження енергії та сумарного спіну), засвідчує, що ці закони не дотримуються. Фермі висунув гіпотезу, що у процесі розпаду утворюється деяка частинка з нульовим зарядом та масою спокою і спіном, який дорівнює $\frac{1}{2}$. Частинку

називають *нейтрино* (маленьким нейтроном). Точніше, при β^+ -розпаді утворюються нейтрино ν , а при β^- -розпаді – *антинейтрино* ν' .

Отже, β -розпад відбувається за такими схемами:



Гіпотеза Фермі щодо існування нейтрино (антинейтрино) знайшла експериментальне підтвердження через десятки років.

Гама-випромінювання. Позитрон. Гама-випромінювання за своїми властивостями подібне до рентгенівського. Оскільки їхні властивості збігаються, це засвідчує однакову природу таких випромінювань. Гама-випромінювання – електромагнітні хвилі ще меншої довжини, ніж рентгенівські промені.

При опроміненні речовини γ -променями з великим рівнем енергії утворюється, як засвідчили експерименти, пара частинок зі всіма тотожними властивостями, окрім знака електричного заряду. Це електрон і позитрон (позитивний електрон).

За Діраком, якщо γ -квант високої енергії летітиме близько біля ядра важкого атома з сильним електричним полем, то він у змозі підняти один із електронів атома з нижчої на вищу оболонку. Внаслідок цього на нижчій оболонці виникне недостатній від'ємний заряд – позитивно заряджена "дірка" – позитрон.

Можливий і обернений процес: при наближенні позитрона з електроном вони взаємодіють так, що обидва зникають (анігілюють), утворюючи 2 гама-кванти.

Анігіляція є причиною відсутності позитронів на Землі. Кожен з них через мізерний час після свого утворення об'єднується з електроном середовища, унаслідок чого утворюються γ -кванти.

Дефект маси, енергія зв'язку і стійкість атомних ядер. Як засвідчують експериментальні дані, маса ядра будь-якого атома в усіх випадках є меншою від суми мас нуклонів, які формують ядро. Пояснити це можливо, використовуючи відкритий Айнштайном закон взаємозв'язку між масою та енергією:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2, \quad (5.4.8)$$

де Δm – різниця між масою нуклонів ядра та масою самого ядра; c – швидкість світла.

Величина ΔE – енергія, яку треба витратити на розпад ядра на вільні нуклони (*енергія зв'язку*). Енергія зв'язку характеризує стійкість ядер: чим вона більша, тим ядро стійкіше.

Співвідношення (5.4.8) засвідчує, що мірою енергії зв'язку є величина Δm , яку називають *дефектом маси*.

Конкретизуючи співвідношення (5.4.8.) щодо ядра атома, маємо:

$$\Delta E = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2, \quad (5.4.9)$$

де Z – протонне число; A – нуклонне число; m_p , m_n і $m_{\text{я}}$ – маси протона, нейтрона і ядра, відповідно.

При утворенні ядер із нуклонів енергія зв'язку вивільнюється у докільля.

Поділ важких ядер. При радіоактивному розпаді внаслідок ядерних перетворень вивільнюється схована *ядерна енергія*, однак цей процес сповільнений, оскільки величина періоду напіврозпаду більшості поширених на Землі нуклідів є незначною. Проте існують інші типи ядерних реакцій, за яких швидкість виділення енергії може змінюватись у широких межах, а енергія, яка при цьому випромінюється, може сягати величезних значень.

Ган і Шрасман першими відкрили існування таких типів ядерних реакцій, коли первісне материнське ядро не просто перетворюється у ядро атома, розташованого поруч у таблиці Менделєєва, а ділиться на уламки з протонними числами суттєво меншими, ніж у материнського ядра. Вчені визначили, що при опромінуванні Урану нейтронами утворюються хімічні елементи із

середини періодичної системи – Барій і Лантан. Пояснили цей процес Фріш і Майтнер.

З'ясовано, що нуклонне число материнського ядра дорівнює сумі нуклонних чисел уламків з деяким дефіцитом. Різниця між масами вивільнюється у вигляді енергії.

Існують три ізотопи Урану ${}_{92}^{234}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$ і ${}_{92}^{238}\text{U}$, які за відношенням до процесу ділення поведуть себе по-різному. За нормальних умов ${}_{92}^{234}\text{U}$ трапляється у надзвичайно мізерних кількостях, ${}_{92}^{235}\text{U}$ – дещо частіше, переважає ${}_{92}^{238}\text{U}$; співвідношення кількостей, відповідно, $(6 \cdot 10^{-5} : 7 \cdot 10^{-3} : 1)$. Не беручи до уваги ${}_{92}^{234}\text{U}$, зазначимо, що для поділу ядер ${}_{92}^{238}\text{U}$ необхідні тільки швидкі нейтрони, а ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$ для реалізації цього процесу влаштовують і повільні, при тім, що ймовірність ділення повільними нейтронами більша.

Під час поділу ядер ${}_{92}^{235}\text{U}$, окрім уламків ядер, спочатку вилітають 2–3 нейтрони. Вони вилітають протягом 10^{-14} с, отож отримали назву *миттєвих*. Згодом вилітають запізнілі нейтрони (до 1% від загальної кількості нейтронів).

Ланцюгова ядерна реакція. Нейтрони, які виникли при поділі уранових ядер (вторинні нейтрони поділу), можуть спричинити поділ нових ядер урану, тобто викликати *ланцюгову реакцію*. Однак у природі вона не відбувається, оскільки ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$, які складають більшість у природному урані, активно захоплюють нейтрони і самі при цьому не діляться.

Ланцюгову реакцію в Урані можна здійснити двома шляхами: або виокремлювати із натурального Урану ізоотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$ (що важко, однак можливо), або шукати інший об'єкт поділу, наприклад ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. На практиці реалізовано обидва шляхи.

Ланцюгова реакція у чистому Урані-235, як і в іншому елементі, здатному до поділу, виникне за умови, що *коєфіцієнт*

розмноження нейтронів $K \geq 1$. Цей коефіцієнт дорівнює відношенню кількості нейтронів, які виникли після акту поділу ядер, до тієї кількості, яка цей поділ спричинила.

Виконання умови $K \geq 1$ можливе, якщо маса Урану-235 достатньо велика, оскільки, за малих розмірів уранового тіла, ймовірність вильоту вторинних нейтронів за його межі дуже велика.

Найменшу масу Урану-235, починаючи від якої можлива незагасаюча ланцюгова реакція поділу, називають *критичною масою* ($K = 1$). При масах, більших за критичну ($K > 1$), ланцюгова реакція відбувається бурхливо, що може спричинити вибух.

Досвід реалізації ланцюгових реакцій на ядрах Урану дозволив з'ясувати, що ці реакції можливі і на природному, дещо збагаченому ізотопом ${}_{92}^{235}\text{U}$, Урані, якщо використовувати сповільнення швидких вторинних нейтронів. Експерименти засвідчили, що сповільнення нейтронів до теплових швидкостей збільшує ймовірність їхнього захоплення ядрами ${}_{92}^{235}\text{U}$ і зменшує поглинальну здатність ядер ${}_{92}^{238}\text{U}$. Виникає перевага у поглинанні для ядер Урану-235, і ланцюгова реакція стає можливою. Сповільнення швидких нейтронів здійснюють, розташовуючи стержні з природного урану у сповільнювач, який слабо поглинає нейтрони, проте здатний їх сповільнювати (наприклад, графіт, важка вода, берилій).

Розглянемо інший, згаданий вище, шлях реалізації ланцюгової реакції. Ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$ є перепорою для ланцюгової реакції, проте з'ясувалось наступне. Уран-238, захопивши нейтрон, перетворюється в ізотоп Урану ${}_{92}^{239}\text{U}$:



який є нестійким. Випускаючи електрон, він перетворюється у Нептуній:



який також не є стійким і швидко розпадається:



Плутоній доволі стійкий і, подібно до Урану-235, при бомбардуванні його нейтронами розщепляється, викидаючи нові нейтрони.

Термоядерні реакції. Реакції поділу важких ядер супроводжуються виділенням значної кількості енергії, проте джерелом ще більших її величин є синтез легких ядер. Уперше ідею про синтез, як джерело енергії Сонця та зірок, запропонували 1929 р. Аткинсон і Хоутермакс. Через 10 років Бете запропонував послідовність ядерних реакцій синтезу, а ще через 15 років ідея знайшла практичне втілення при вибухові першої водневої бомби в СРСР, пов'язаної з іменем Сахарова. Реакції синтезу енергетично ефективніші від реакцій поділу, оскільки при синтезі в енергію перетворюється близько 1% початкової маси, а при розпаді – лише 0,09%.

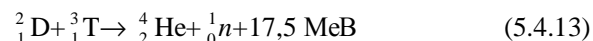
Природні реакції синтезу відбуваються на Сонці за умов високої температури (вважається, що у центрі Сонця температура сягає 20 млн градусів). Отож їх називають *термоядерними*.

Висока температура для реалізації синтезу потрібна для подолання кулонівського відштовхування, яке не дає змоги ядрам зблизитись на достатньо малу відстань (близько $2 \cdot 10^{-15}$ м), коли починають діяти ядерні сили. Зазначимо, що навіть за умов на Сонці процеси зіткнення ядер є дуже малоймовірними. Лише один з мільйона атомів потерпає від співударяння протягом року, тому Сонце не згоріло до нашого часу.

Для штучного створення термоядерних процесів необхідна ще вища температура, ніж на Сонці, щоб мати помітний енергетичний вихід за розумний проміжок часу. У центрі атомної бомби температура оцінена у 70 млн градусів. Отже, енергія поділу важких атомів може слугувати джерелом для штучного синтезу легких елементів.

До речовин, які мають найсприятливіші властивості для розвитку термоядерної реакції, необхідно зачислити важкий водень

(${}^2_1\text{D}$), надважкий водень (${}^3_1\text{T}$), літій (${}^6_3\text{Li}$). У суміші цих речовин можуть здійснюватись такі ядерні реакції:



Систему із атомної бомби і речовини, у якій при її вибухові виникає потужна термоядерна реакція, називають термоядерною або *Н-бомбою*. У Н-бомбі термоядерна реакція є неконтрольованою. Для утворення контрольованих реакцій цього типу необхідно утворити і підтримувати у деякому об'ємі плазму при температурі порядку 10^8K .

Задачі

Задача 5.4.1. Енергія, яку отримує Земля від Сонця у розрахунку на одиничну ділянку, перпендикулярну до сонячних променів, дорівнює $8 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{хв}}$. Яка кількість водню (у тоннах за хвилину) витрачається у реакції $4 {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 {}^0_{+1}\text{e}$, щоб Сонце мало змогу забезпечити таку кількість енергії?

Розв'язання. Визначимо енергію, яка виділяється при синтезі $4 {}^1_1\text{H}$ у ${}^4_2\text{He}$ за формулою:

$$E = \Delta m \cdot c^2.$$

Дефект маси Δm дорівнює:

$$\Delta m = (4m_{{}^1_1\text{H}} - m_{{}^4_2\text{He}} - 2m_{{}^0_{+1}\text{e}}) =$$

$$= (4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} - 6,64 \cdot 10^{-27} - 2 \cdot 0,0009 \cdot 10^{-27}) = 4,39 \cdot 10^{-29} \text{ кг}.$$

Відповідно:

$$E = 4,39 \cdot 10^{-29} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = 3,95 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}.$$

Земля розташована на відстані $R = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$ від Сонця і кожної хвилини надсилає на 1 м^2 сферичної поверхні радіуса R енергію $\varepsilon = 8 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{хв}}$. Тому вся енергія, що надходить від Сонця за 1 хв, становитиме:

$$W = \varepsilon \cdot 4\pi R^2.$$

Визначимо кількість актів синтезу за 1 хвилину як відношення:

$$N = \frac{W}{E} = \frac{4\pi\varepsilon R^2}{E}.$$

З іншого боку, величина N є відношенням маси витраченого за хвилину водню M_x до маси чотирьох атомів ${}^1_1\text{H}$, які беруть участь в одному акті синтезу:

$$N = \frac{M_x}{4m_{{}^1_1\text{H}}}.$$

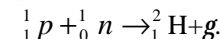
Отже, маємо:

$$\frac{4\pi\varepsilon R^2}{E} = \frac{M_x}{4m_{{}^1_1\text{H}}}, \text{ звідки}$$

$$M_x = \frac{16\pi\varepsilon R^2 m_{{}^1_1\text{H}}}{E} = 3,78 \cdot 10^{13} \frac{\text{кг}}{\text{хв}}.$$

Задача 5.4.2. Обчислити енергію, яка виділяється під час злиття протона і нейтрона в ядро дейтерію, а також довжину хвилі γ -кванта, вважаючи, що вся виділена енергія пішла на його утворення.

Розв'язання. Рівняння реакції синтезу має вигляд:



Виділену під час реакції енергію обчислюємо за формулою:

$$\Delta E = 931,5 \cdot \Delta m = 1,71 \text{ MeV} = 2,74 \cdot 10^{-13} \text{ Дж},$$

де $\Delta m = m_p + m_n - m_\alpha$ – дефект маси в а.о.м. З таблиць $m_p = 1,00728$ а.о.м., $m_n = 1,00866$ а.о.м., $m_\alpha = 2,01410$ а.о.м., тоді дефект маси $\Delta m = 0,00184$ а.о.м.

Довжину хвилі γ -кванта обчислюємо з формули Планка:

$$\varepsilon = h\nu = hc/\lambda,$$

звідки

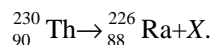
$$\lambda = hc/\varepsilon,$$

де $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі. За умовою $\varepsilon = \Delta E$, тоді

$$\lambda = hc/\Delta E = 7,25 \cdot 10^{13} \text{ м.}$$

Задача 5.4.3. Ядро Торію ${}^{230}_{90}\text{Th}$ перетворилось у ядро Радію ${}^{226}_{88}\text{Ra}$. Яку частинку випромінює ядро Торію?

Розв'язання. Запишемо рівняння ядерної реакції, позначивши невідому частинку літерою X:



Із законів збереження нуклонного та протонного чисел маємо:

$$\begin{aligned} 230 &= 226 + A; & A &= 4; \\ 90 &= 88 + Z; & Z &= 2. \end{aligned}$$

Отже: ${}^A_Z X = {}^4_2 X$. Це α -частинка (${}^4_2\alpha$).

Тема 5.5. Елементарні частинки

Опрацювати такі питання лекційного матеріалу:

- класифікація елементарних частинок;
- фотони;
- лептони;
- мезони;
- баріони;
- античастинки;
- кварки;
- космічні промені.

Елементарними називають частинки, яким на сучасному рівні знань не можна присвоїти певну внутрішню структуру, тобто не можна уявити їх такими, що складаються з будь-яких інших частинок.

Сьогодні відомо близько 400 елементарних частинок, основна особливість яких полягає в їхній здатності до взаємоперетворень. Частинки беруть участь у багатьох процесах пружного і непружного розсіювання, а також у нескінченній кількості народження і розпадів. Уся багатоманітність подібних перетворень скеровується всього чотирма фундаментальними типами взаємодії: *гравітаційною взаємодією, слабою взаємодією, сильною взаємодією та електромагнітною взаємодією.*

Гравітаційна взаємодія найслабша і в процесах мікросвіту суттєвої ролі не відіграє.

Сильна взаємодія притаманна важким елементарним частинкам. Вона зумовлює зв'язок нуклонів у ядрі (ядерна взаємодія).

Електромагнітна взаємодія спостерігається між електрично зарядженими частинками.

Слаба взаємодія відповідає за усі види β -розпаду ядер, за спонтанний розпад багатьох елементарних частинок, за процеси взаємодії нейтрино з речовиною.

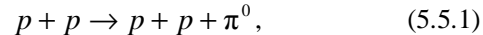
Класифікація елементарних частинок. Якщо в основу класифікації частинок покласти величину маси спокою частинки, то отримаємо чотири групи: *фотони, лептони, мезони, баріони.*

Найважливішою загальною властивістю елементарних частинок слугує їхня здатність до взаємного перетворення. При розпаді частинок одні частинки зникають, інші народжуються. Частинки перетворюються і при зіткненнях двох частинок високих енергій. В усіх перетвореннях частинок виконується *закон збереження повної енергії*, у тім числі енергії, яка відповідає масам спокою частинок, і кінетичній енергії частинок, причому ці енергії можуть переходити одна в одну.

Під час спонтанного розпаду частинки сумарна маса спокою частинок, які утворюються, менша від маси спокою частинки, що

розпалася, а енергія, яка відповідає цій різниці мас спокою, перетворюється в кінетичну енергію частинок – продуктів розпаду.

При зіткненні двох частинок можливе обернене перетворення енергії. Наприклад, два протони, зіткнувшись, можуть утворити *піон*:



якщо їхня кінетична енергія в процесі зіткнення перевищує енергію, яка відповідає масі спокою піона.

При перетвореннях частинок, окрім закону збереження повної енергії, виконуються закони збереження заряду та кількості руху.

Найважливішою характеристикою частинки є її маса, яка відображає інертні та гравітаційні властивості частинки і водночас наявний у ній запас енергії. Найлегшою частинкою, яка має масу спокою, є електрон.

Більшість частинок мають *спін*, тобто власний момент кількості руху. Спін частинки кожного виду має точно певне значення: якщо спін фотона взято за одиницю, то всі частинки мають спін 0, $\frac{1}{2}$ або 1 (крім *гіперона* Ω^- , спін якого дорівнює $\frac{3}{2}$).

Деякі частинки нейтральні, інші мають позитивний або негативний заряд, що дорівнює за величиною заряду електрона.

Майже всі елементарні частинки нестабільні. У вільному стані стабільні тільки протон, електрон і частинки, які не мають маси спокою (фотон і нейтрино). Решта частинок спонтанно розпадаються і всі, окрім нейтрона, мають дуже недовгий середній час життя.

Фотони – γ -кванти електромагнітного поля, вони мають масу спокою і заряд, рівні нулю, спін, рівний 1^h , беруть участь лише в електромагнітних взаємодіях.

Лептони. Загальна кількість лептонів невелика – їх усього 6: три заряджені (електрон e^- , *мюон* μ^- , *таон* τ^-) і три нейтральні супутники (*електронне нейтрино* ν_e , *мюонне нейтрино* ν_μ , *таонне нейтрино* ν_τ). Лептонам притаманні малі маси спокою. Серед цих частинок найбільшу масу має τ -лептон, найменшу – електронне нейтрино. Лептони беруть участь лише в

електромагнітних і слабких взаємодіях. Усі лептони мають напівцілий спін. Щоб виокремити клас лептонів з множини частинок і розрізнити лептони та антилептони, введено нову фізичну величину – *лептонний заряд* L . Для всіх лептонів $L = +1$, для всіх антилептонів $L = -1$, для решти частинок $L = 0$.

Електрони (див. ч.3) – це елементарні частинки, які володіють власним моментом імпульсу – спіном, що дорівнює $\frac{1}{2}h$.

Магнітний момент електрона практично дорівнює *магнетону Бора*, а саме:

$$\mu_e = -(1 + 0,0012)\mu_B. \quad (5.5.2)$$

Знак „мінус” означає, що магнітний і механічний моменти електрона мають протилежні напрями.

Електрон є стабільною частинкою, яка спонтанно не перетворюється в інші частинки. Поряд з негативними електронами існують позитивні електрони – позитрони, які щодо електронів є античастинками. Позитрон відрізняється від електрона лише знаком електричного та електронного лептонного заряду. Абсолютні величини цих зарядів і всі інші характеристики електронів та позитронів збігаються.

Електричний заряд мюонів за абсолютною величиною дорівнює заряду електрона. Позитивно та негативно заряджені мюони фігурують, відповідно, як частинка та античастинка. Маса мюонів становить 206,8 електронних мас, їхній спін дорівнює $\frac{1}{2}h$.

Середній час життя нерухомих мюонів становить $2,15 \cdot 10^{-6}$ с.

Нейтрино та антинейтрино, які випромінюються разом з позитронами та електронами, відрізняються від нейтрино та антинейтрино, які отримуються разом із мюонами.

Мезони – частинки з масою спокою, проміжною між масами лептонів і масами дещо важчих частинок – баріонів. Мезони мають нульовий спін. Вони можуть бути електрично зарядженими і нейтральними. До мезонів зачислено піони (π -мезони), *каони* (K -мезони), етон (η -мезон). Мезони нестабільні і спонтанно

розпадаються на електрон (чи позитрон) і нейтрино; середній час життя мезона дорівнює мільйонній частці секунди.

На відміну від мюонів π -мезони сильно взаємодіють з атомними ядрами і, проникаючи в них, викликають ядерні перетворення. Особливе значення для ядерної фізики має можливий обмін зарядженими π -мезонами між різнотипними нуклонами та нейтральними π -мезонами між однотипними нуклонами всередині ядра.

Баріони – найважчі серед елементарних частинок. Вони складаються з двох підгруп – *нуклонів* та *гіперонів*. У зв'язку з явищем анігіляції нуклонів та антинуклонів введено поняття – *баріонний заряд* B . Нейтрон і протон мають баріонний заряд $+1$, а антинейтрон і антипротон -1 . Баріони характеризуються напівцілим спіном.

З мезонами їх об'єднує здатність брати участь у сильних взаємодіях, унаслідок чого мезони та баріони об'єднані в групу *адронів*.

До нуклонів зачислено протон (p) і *антипротон* (\bar{p}), нейтрон (n) і *антинейтрон* (\bar{n}). Протон – стабільна частинка, час його життя порядку 10^{32} років.

Існування антипротона передбачено теорією Дірака. Експериментально його відкрито через чверть століття у 1955 р. Антипротон має масу, що дорівнює масі протона. Його електричний заряд однаковий за знаком і за величиною з зарядом електрона. Магнітний момент однаковий за величиною з магнітним моментом протона, однак від'ємний, а це засвідчує, що напрям спіну і магнітного момента в антипротона протилежні.

Нейтрон не має електричного заряду і володіє високою проникною здатністю, оскільки, рухаючись в речовині, він не витрачає енергію на йонізацію, випромінювання тощо. Нейтрон – нестабільна частинка, яка після звільнення з атомного ядра через деякий час розпадається. Період напіврозпаду нейтрона 930 с.

Античастинкою до нейтрона є антинейтрон. Це елементарна частинка з такою ж масою, як і в нейтрона. Магнітний момент

антинейтрона дорівнює за абсолютною величиною магнітному моменту нейтрона, однак протилежний йому за знаком.

Гіперони належать також до групи баріонів, однак їхня маса перевищує масу нуклонів. Їх позначають великими літерами грецького алфавіту. Існують електрично заряджені і нейтральні гіперони. Гіперони походять від нуклонів, вони ж є кінцевими продуктами їхнього розпаду. Оскільки гіперони здатні замінювати нуклони в атомних ядрах, унаслідок чого виникають нестабільні гіпер'ядра, їх розглядають як збуджений стан нуклона.

Античастинки. З релятивістської квантової теорії випливає, що для кожної частинки має існувати античастинка, тобто подібна до неї частинка, з такою самою величиною маси, спіну, часу життя, однак яка відрізняється від неї знаком заряду, взаємним розміщенням вектора магнітного моменту і спіну та деякими іншими характеристиками.

Першою виявленою на досліді античастинкою був „позитивний електрон” – позитрон. Прикладами таких пар *частинка - античастинка* є також негативний і позитивний мюони, позитивні і негативні піони і каони. Інші частинки називають, додаючи до назви відповідних частинок префікс „анти”, а для їхнього позначення застосовують ті самі індекси, але з хвилястою рисочкою зверху. У фотона, нейтрального піона та ета-мезона немає античастинок (можна сказати, що в цих випадках частинка і античастинка збігаються).

Як і відповідні частинки, антипротон, позитрон, антинейтрино стійкі, решта античастинок нестабільні. Античастинки розпадаються на відповідні античастинки.

Характерною особливістю взаємодії частинок з античастинками полягає в тому, що при зіткненні одна з одною обидві вони можуть *анігілювати*, точніше перетворитись у випромінювання або в частинки меншої маси.

Відкриття Лоуреном антинуклонів засвідчує можливість існування *антиречовини*, цілком сформованої з античастинок. Наприклад, негативно заряджений антипротон з позитроном, що обертається навколо нього, є антиводнем. Антинуклони можуть утворювати ядра інших антиатомів. Через реакцію анігіляції антиречовина не може існувати стабільно разом з речовиною.

Оскільки при анігіляції виділяється значна енергія, суміш речовини та антиречовини є ідеальним паливом максимально можливої калорійності. Воно приблизно в тисячу разів калорійніше від палива, яке використовує ядерний поділ.

Кварки. Після підтвердження існування протонів і нейтронів та формулювання моделі ядра, ці частинки зачислено до розряду *фундаментальних*, тобто таких, які слугують „будівельним матеріалом” для складання інших утворень.

Проведення дослідження пружного і непружного розсіяння електронів на протонах і нейтронах виявили, що, по-перше, електричний заряд і магнітний момент розподілені в цих частинках нерівномірно. По-друге, дали змогу виявити зернисту структуру як протона, так і нейтрона.

Пояснити виявлені особливості частинок і їхню чисельність можна лише тим, що нейрон, протон та інші адрони не належать до класу фундаментальних, а самі складаються зі ще простіших частинок. Під час взаємодії останні об'єднуються в інші комбінації, утворюючи нові частинки. Оскільки загальна кількість частинок у цьому процесі залишається постійною, сталою є й сума квантових чисел.

Американський фізик Гелл-Манн згрупував частинки, взявши за основу деякі їхні подібності, водночас нехтуючи окремими розбіжностями. Наприклад, протон і нейтрон за більшістю ознак тотожні, хоча і відрізняються зарядом. Їх вважають двома різновидами одного типу частинок – нуклонів, що утворює *дублет*. Групи з трьох частинок утворюють *триплет*, групи з однієї частинки – *синглет*. Загальна назва групи, що налічує будь-яку кількість частинок, називається *мультиплетом*.

Беручи до уваги, що нейтрон володіє від'ємним магнітним моментом, а сам по собі нейтральний, і намагаючись пояснити поведінку адронів у сильних взаємодіях, Гелл-Манн зауважив, що кожен адрон складається з триплету частинок із дробовим електричним зарядом протона. Такі частинки він назвав *кварками*.

Існування кварків підтверджено експериментально шляхом дослідження глибоко непружного розсіяння електронів на нуклонах. Дослідження виконано на лінійному прискорювачі електронів, в якому електрони розганялися до швидкості

$0,9999999999$ с, де c – швидкість світла. Експерименти виявили в десятки разів більше розсіяння електронів, ніж передбачалося. Отже, вони розсіювались точковими твердими центрами, що містилися в нуклонах. Так встановлено структуру нуклонів, а точкові складові нуклонів ідентифіковано як кварки. Їхні властивості збіглися з теоретично передбаченими. Існує також гіпотеза, що кварки не належать до фундаментальних частинок, вони теж є складеними частинками. Їхніми складовими є одновимірні струни з довжиною 10^{-31} м, частотою $\nu = (mc^2)/h$ та двовимірні мембрани.

Космічні промені. З космічного простору на Землю падають потоки частинок – атомних ядер великої енергії, а також інші частинки, створені цими ядрами в атмосфері Землі. Усі ці частинки називають *космічними променями*. Саме в космічних променях були відкриті перші елементарні частинки: позитрон (1932), мюони (1937), p – та K -мезони (1947), а також Λ^0 – , Σ^\pm –гіперони.

Розрізняють *первинні* і *вторинні космічні промені*. Космічні промені за межами земної атмосфери називають первинними космічними променями, інтенсивність яких на висотах, вищих, ніж 50-60 км над рівнем Землі, постійна. З наближенням до Землі спостерігається різка зміна інтенсивності, з чого випливає, що, окрім первинних, існують ще вторинні космічні промені.

У складі вторинних космічних променів розрізняють *м'яку* і *жорстку компоненти*. М'яка компонента сформована з лавин електронно-позитронних пар. γ -фотон, котрий виник внаслідок розпаду π^0 -мезону (за схемою $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$) чи різкого гальмування швидкого електрона, пролітаючи поблизу атомного ядра, створює електронно-позитронну пару. Гальмування цих частинок знову спричинює утворення γ -фотонів і т.д.

Жорстка, проникаюча компонента космічних променів сформована, здебільшого, з мюонів. Її утворення відбувається переважно у верхніх і середніх шарах атмосфери за рахунок розпаду заряджених π -мезонів.

За допомогою приладів, які встановлювались на штучних супутниках Землі і космічних ракетах, поза земною атмосферою

виявлено *навколоземні радіаційні пояси* (зони), які становлять дві розмежовані області з досить підвищеною інтенсивністю космічних променів (порівняно зі спостережуваною на відносно малих висотах). Утворення цих поясів спричинене захопленням і утриманням заряджених частинок магнітним полем Землі.

Гіпотези щодо походження первинного космічного випромінювання базуються на даних про енергію первинних частинок і на радіометричних даних. Вважають, що в первинних променях заряджені частинки набувають великих енергій завдяки прискоренню, яке вони отримують в електромагнітних полях зірок і Сонця.

Практичне завдання

Задача 5.6.1. Гама-квант частоти ν , зіштовхнувшись з нерухомою частинкою, почав рухатись під кутом ϕ до початкового напрямку. Частота кванта зменшилась на $\Delta\nu \ll \nu$. Визначити масу частинки, з якою зіткнувся γ -квант.

$$\text{Відповідь: } m = \frac{h\nu^2}{c^2\Delta\nu} (1 - \cos\phi).$$

Задача 5.6.2. У більшості телевізійних кінескопів прискорююча напруга порядку 20 000 В. Чому дорівнює довжина хвилі електронів у кінескопі?

$$\text{Відповідь: } 8,7 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

Задача 5.6.3. Визначити потенціал йонізації атома Гідрогену.

$$\text{Відповідь: } 13,5 \text{ В.}$$

Задача 5.6.4. При розпаді π -мезона утворились два фотони з енергіями ϵ_1 і ϵ_2 , які летять у різні боки. Визначити швидкість мезона до розпаду.

$$\text{Відповідь: } v = c \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}.$$

Задача 5.6.5. Період напіврозпаду Полонію ${}_{84}^{210}\text{Po}$ 140 діб. Випромінюючи α -частинку, Полоній перетворюється у стабільний Плюмбум ${}_{82}^{208}\text{Pb}$. Скільки свинцю утвориться із 100 мг полонію за 100 діб.

Відповідь: 0,38 мг.

Задача 5.6.6. При розпаді одного атома ${}_{92}^{235}\text{Li}$ на два осколки виділяється близько 200 МеВ енергії. Якій кількості енергії у кВт-год відповідає „спалювання” у ядерному реакторі 1 г урану-235? Яка кількість умовного палива (теплотворна здатність $2,94 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$) виділяє таку ж енергію?

$$\text{Відповідь: } 2,3 \cdot 10^4 \text{ кВт-год ; 2,7 тонни.}$$

Задача 5.6.7. Яку масу урану використовує ядерний реактор за годину, якщо він виділяє потужність 10^4 кВт? При поділі кожного ядра Урану-235 виділяється приблизно 200 МеВ енергії.

$$\text{Відповідь: } 4 \cdot 10^{10} \text{ т.}$$

Задача 5.6.8. Вирахувати енергію зв'язку ядер Тритію.

$$\text{Відповідь: } 8,75 \text{ МеВ.}$$

Задача 5.6.9. Мінімальна частота світла, що вириває електрони з поверхні металевого катода, $\nu_0 = 6,0 \cdot 10^{14}$ Гц. За якої частоти світла електрони, що вилетіли з металу, повністю затримуються різницею потенціалів $U = 3,0$ В?

$$\text{Відповідь: } 1,3 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$

Задача 5.6.10. Обчислити, яка червона межа фотоелемента, катод якого виготовлено зі сплаву платини з цезієм. Робота виходу електрона з такого катода дорівнює $2,24 \cdot 10^{-19}$ Дж.

$$\text{Відповідь: } 3,39 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}.$$

Задача 5.6.11. Гелій-неоновий лазер працює в неперервному режимі, розвиваючи потужність 2,0 мВт. Випромінювання лазера має довжину хвилі 630 нм. Скільки фотонів випромінює лазер за одну секунду?

$$\text{Відповідь: } 6,3 \cdot 10^{15}.$$

Задача 5.6.12. Обчислити величину електричного поля на першій орбіті в атомі Гідрогену, а також відношення сили кулонівського притягання до сили тяжіння між ядром і електроном.

$$\text{Відповідь: } 5,15 \cdot 10^9 \text{ В/см ; } 2,26 \cdot 10^{39}.$$

Задача 5.6.13. Знайти довжину хвилі де Бройля для електрона, енергія якого дорівнює 10^6 eВ.

Відповідь: $8,74 \cdot 10^{-11}$ см.

Задача 5.6.14. Нейтральна частинка, що рухається зі швидкістю u , розпадається на два фотони. Визначити мінімальний кут Θ_{\min} , під яким розлітаються ці фотони.

Відповідь: $2 \arccos \frac{u}{c}$.

Задача 5.6.15. Чому дорівнює період напіврозпаду ізотопу, якщо за добу розпадається в середньому 750 атомів з 1000?

Відповідь: 12 год.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф.* Курс фізики. Т. 2. – К.: Вища школа, 2002.
2. *Вайданич В.І., Пенцак Г.М.* Фізика. – Львів: Національний лісотехнічний університет України, 2005.
3. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1985.
4. *Грабовский Р.И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 1980.
5. *Караван Ю.В., Клос Є.С.* Малий фізичний довідник. – Львів: Світ, 1997.
6. *Клос Є.С., Болюбаш Я.Я., Караван Ю.В., Пастернак Н.В.* Фізика. Практикум. – Львів: Вища школа, 1989.
7. *Кучерук І.М., Горбачук І.Е., Луцик П.П.* Загальний курс фізики. – К.: Техніка, 1999.
8. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Т. 3. – М.: Наука, 1999.
9. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 5. – М.: Наука, 1979.

ЗМІСТ

Пояснювальна записка.....	3
Тема 5.1. Квантова природа світла.....	3
Тема 5.2. Фотоелектричний ефект.....	9
Тема 5.3. Елементи атомної фізики.....	13
Тема 5.4. Елементи фізики атомного ядра.....	29
Тема 5.5. Елементарні частинки.....	43
Практичне завдання.....	51
Список літератури.....	54