

Міністерство освіти і науки України
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

О. І. Богатирьов

Фізика ядра

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

Б 73 **ФІЗИКА ЯДРА:** Навчально-методичний посібник для студентів
фізичних спеціальностей. – Черкаси: Вид. від ЧНУ імені Богдана
Хмельницького, 2013. - с.

ISBN

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

Для студентів фізичних спеціальностей університетів.

УДК 53: 378.147.88

ББК 22.30 р30

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

ISBN

© ЧНУ ім. БХмельницького, 2013

© О.І. Богатирьов, 2013

Зміст

Передмова	
1. Зміст дисципліни	
2. Рекомендована література	
2.1 Основна література.....	
2.2 Допоміжна література.....	
3. Теоретичний матеріал, знання якого необхідне для успішного виконання роботи	
3.1 Склад і характеристики ядер.....	
3.2 Радіоактивність.....	
3.3 Ядерні реакції.....	
3.4 Ділення та синтез атомних ядер.....	
3.5 Взаємодія ядерного випромінювання з речовиною.....	
3.6 Методи дослідження у ядерній фізиці.....	
3.7 Характеристики частинок високих енергій.....	
4. Приклади розв’язування задач	
5. Розподіл завдань за варіантами	
6. Завдання для контрольної роботи	
7. Таблиці деяких фізичних величин	

Передмова

Фізика ядра і елементарних частинок є заключним розділом загального курсу фізики. Тут досліджуються матеріальні об'єкти, розміри яких на декілька порядків менші розмірів атомів. На сучасному етапі розвитку науки вивчення таких об'єктів відбувається виключно шляхом спостереження їх зіткнень та розпадів. Дослідження цих процесів, що власне і складає суть ядерної фізики, потребує потужної експериментальної бази.

Перетворення атомних ядер супроводжується високоенергетичним випромінюванням електромагнітних хвиль. Взаємодія цього випромінювання з речовиною також є предметом дослідження у ядерній фізиці.

При поділі та синтезі ядер вивільнюється значна енергія, яка у мільйони разів перевищує енергію хімічних реакцій. Керовані ядерні реакції знайшли широке використання для одержання електричного струму. Відтак ядерна фізика має і надзвичайно велике прикладне застосування.

Вивчення цього розділу фізики відіграє важливу роль у розумінні єдності світу, побудові його фізичної картини, еволюційних процесів, що відбуваються у всесвіті, у розробці безпечних технологій використання ядерної енергетики.

Основним завданням даної дисципліни є завершення формування у свідомості студентів природничо-наукової картини світу, сучасних уявлень про його минуле, сьогодення та перспективи подальшого розвитку. Важливим при цьому є наукове визначення місця людини у нашому світі, збереження цього світу, вироблення у студентів глибокого екологічного мислення і свідомої осмисленої поведінки.

По завершенню вивчення фізики ядра і елементарних частинок студенти повинні знати основні поняття, закономірності та закони субатомного світу, методологію його дослідження, розуміти напрямки застосування одержаних знань у практичній діяльності людини. Студенти повинні у повній мірі оволодіти навичками самостійного пошуку і відбору літературних джерел як на паперових, так і на електронних носіях.

Важливе значення у засвоєнні студентами знань з фізики є уміння розв'язувати задачі. Рівень набутих навичок у цій справі слугує безумовним показником якості підготовки студента. З метою контролю та оцінювання таких умінь навчальними планами підготовки бакалаврів передбачено самостійне

домашнє виконання студентом розрахунково-графічних робіт з фізики атомного ядра. Призначення цього посібника – дати поради, спрямовані на належне виконання та оформлення такої роботи.

Посібник містить теоретичний матеріал, який студенту необхідно добре опрацювати, перш ніж приступити до розв’язування задач. У посібнику також наведено перелік необхідної літератури та значну кількість прикладів розв’язання типових фізичних завдань з курсу фізики ядра. Ці приклади слід уважно проаналізувати як з точки зору оформлення робіт, так і для порівняння своїх задач зі схожими розв’язаними.

Студент повинен визначити згідно свого варіанту сім завдань із 280, наведених у посібнику. Усього пропонується 40 приблизно однакових за складністю варіантів. Номер варіанту для студента визначає викладач. Багатоваріантність спрямована на забезпечення самостійності виконання роботи, на унеможливлення плагіату.

Кожне наступне завдання слід розмішувати на новій сторінці зошита чи на окремому аркуші паперу. Розв’язок задачі обов’язково повинен супроводжуватись достатньо повним поясненням з посиланням на використані фізичні закони, містити необхідні рисунки, схеми, графіки. Саме за рівнем та якістю виконання цієї частини роботи викладач оцінює ступінь розуміння студентом фізичних законів та явищ.

Оформлення роботи слід виконувати за існуючим стандартом: спочатку задачу потрібно розв’язати у загальному вигляді, отримати кінцевий вираз для обчислення, а вже потім підставити необхідні числові величини та виконати обрахунки. У переважних випадках слід користуватися Міжнародною системою одиниць (СІ), проте у фізиці ядра допускається і використання деяких позасистемних одиниць – а. о. м., MeB, Кі, бер тощо.

При переведенні розмірностей фізичних величин у СІ, при підстановці чисел у розрахункову формулу, при записі відповіді числове значення величин слід записувати у вигляді добутку десяткового дробу з однією цифрою перед комою на десять у відповідній степені. Так, наприклад, число 43171 потрібно записувати у вигляді $4,3171 \cdot 10^4$, число 0,00352 – у вигляді $3,52 \cdot 10^{-3}$ і т.п. Одержану величину необхідно проаналізувати на її відповідність умові задачі та розмірності.

У додатках посібника наведені деякі константи та необхідні таблиці фізичних величин.

1. ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

Діючими програмами підготовки бакалаврів з фізики передбачено засвоєння студентами наведеного нижче матеріалу з розділу «Фізика ядра і елементарних частинок».

1.1. *Вступ. Фізичні закони у фізиці ядра.*

Основні етапи розвитку фізики ядра та елементарних частинок. Місце фізики атомного ядра і фізики частинок високих енергій у природничих науках. Фізичні закони у фізиці ядра.

1.2. *Загальні властивості атомних ядер.*

Склад ядер. Нуклони, їх властивості: заряд, маса, спин, магнітний момент. Заряд ядра, методи його визначення. Маса ядра і масове число. Ізотопи, ізобари, ізотони. Мас-спектрометри. Розмір і форма ядра. Співвідношення між радіусом ядра і масовим числом. Густина ядерної речовини. Моделі будови ядер. Формула Вейцеккера. Магічні числа.

1.3. *Ядерні перетворення.*

Радіоактивність, типи радіоактивних перетворень. Природна та штучна радіоактивність. Механізми альфа-розпаду і бета-розпаду. Нейтрино, його властивості. Механізм гама-випромінювання. Ефект Мессбауера. Ядерні реакції, їх класифікація. Ділення та синтез атомних ядер. Атомні електростанції. Екологічні проблеми використання ядерної енергії. Реакції синтезу, умови їх здійснення. Проблеми керованого термоядерного синтезу.

1.4. *Ядерні сили.*

Нуклон-нуклонні взаємодії. Величина ядерних сил. Нецентральність ядерних сил, ізотопічна інваріантність, спінова залежність, насиченість і інваріантність ядерних сил відносно просторової інверсії. Обмінний характер. Прояв ядерних сил у характеристиках дейтрона.

1.5. *Взаємодія ядерного випромінювання з речовиною.*

Іонізаційне гальмування заряджених частинок, пружне розсіювання частинок, радіаційне гальмування електронів, черенківське випромінювання, фотоефект, ефект Комптона, утворення електронно-позитронних пар.

1.6. *Експериментальні методи у фізиці високих енергій.*

Методи спостереження і реєстрації мікрочастинок. Лічильники частинок, трекові камери, фотоемульсії. Прискорювачі заряджених частинок. Зустрічні пучки.

1.7. *Елементарні частинки.*

Характеристики частинок (маса, спин, парність, час життя, електричний заряд, лептонний і баріонний заряди, ізоспін і його проекція, дивність,

зачарованість). Резонанси. Взаємоперетворення частинок. Закони збереження. Незбереження просторової парності у слабких взаємодіях. Досліди Ву. Комбінована парність. Фундаментальні взаємодії у природі. Електромагнітна взаємодія і фотон. Сильна взаємодія та структура адронів. Кварки, їх характеристики. Слабка взаємодія. Лептони. Кварк-лептонна симетрія. Електрослабка взаємодія. Велике об'єднання. Космічні промені, гіпотеза їх походження.

1.8. *Сучасна фізична картина світу.*

Матеріальне походження, закони руху матерії, речовина і поле. Корпускулярно-хвильовий дуалізм. Моделі походження і розвитку Всесвіту. Фізика і загальнолюдські цінності.

2. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Під час вивчення теоретичного матеріалу рекомендовано 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. – 463 с.
- 2.1.3. Ахієзер О. І., Бережной Ю. А. Теорія ядра. – К. : Вища школа, 1995. – 255с.
- 2.1.4. Вальтер А. К., Залюбовский И. И. Ядерная физика. – Харьков : « Основа », 1991. – 480 с.
- 2.1.5. Наумов А. И. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М. : Просвещение, 1984. – 384 с.
- 2.1.6. Гаркуша І. П., Горбачук І. Т та ін. Загальний курс фізики. Збірник задач. – К. : Техніка, 2003. – 506 с.
- 2.1.7. Сивухин Д. В. Сборник задач по общему курсу физики. Атомная физика. Физика ядра и элементарных частиц. – М. : Наука, 1981. – 224с.
- 2.1.8. Цедрик М. С. Сборник задач по физике – Минск : Вышэйшая школа, 1989. – 270 с.

2.2. Допоміжна література

- 2.2.1. Колпаков П. Е. Основы ядерной физики. – М. : Просвещение, 1969. – 400 с.
- 2.2.2. Мухин К. Н. Введение в ядерную физику. – М. : Атомиздат, 1965. – 720 с.
- 2.2.3. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – М.: Атомиздат, 1974. – 584 с.
- 2.2.4. Мухин К.Н. Занимательная ядерная физика. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.
- 2.2.5. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. – М.: Наука, 1980. – 728 с.
- 2.2.6. Окунь Л.Е. Физика элементарных частиц. – М.: Наука, 1988. – 272 с.
- 2.2.7. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. – М.: Наука, 1988. – 416 с.
- 2.2.8. Савченко О. Я. Задачи по физике. – М.: Наука, 1988. – 414 с.

3. ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ, ЗНАННЯ ЯКОГО НЕОБХІДНІ ДЛЯ УСПІШНОГО ВИКОНАННЯ РОБОТИ

3.1. Склад і характеристики ядер

3.1.1. Масове число A визначає кількість нуклонів у ядрі атома. Із них Z протонів і $N=A - Z$ нейтронів, де Z – порядковий номер хімічного елемента в таблиці Менделєєва. Ядра з однаковим Z , але з різним A називаються ізотопами; ядра з однаковим A , але з різними Z – ізобари; ядра з однаковою кількістю нейтронів називають ізотонами.

3.1.2. Ядро має позитивний заряд. Носієм заряду є протон. Заряд протона чисельно дорівнює заряду електрона e . Сумарний заряд ядра Ze .

3.1.3. Масу ядра, як і масу атома, виражають в атомних одиницях маси, або в MeV . За атомну одиницю маси приймається $\frac{1}{12}$ маси нукліда ${}_6C^{12}$:

$$1 \text{ а.о.м.} = \frac{1}{12} \cdot \frac{\mu}{N_A} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,502 \text{ MeV},$$

де μ – молекулярна маса Карбону, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро.

Маса протона $m_p = 1,007276 \text{ а.о.м.} = 938,2796 \text{ MeV}$, маса нейтрона $m_n = 1,008665 \text{ а.о.м.} = 939,5731 \text{ MeV}$, маса електрона $m_e = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ а.о.м.} = 0,511 \text{ MeV}$.

3.1.4. При утворенні ядра з окремих нуклонів (протонів та нейтронів) виникає дефект маси – маса ядра виявляється меншою суми мас нуклонів, із яких ядро складається:

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}}$$

3.1.5. Оскільки маса ядра будь-якого хімічного елемента завжди менша суми мас протонів та нейтронів то при утворенні ядра з нуклонів виділяється енергія, яку називають енергією зв'язку $E_{\text{зв}}$:

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

де c – швидкість світла у вакуумі.

Якщо у таблицях наведені не маси ядер, а маси нейтральних атомів, то енергія зв'язку визначатиметься за формулою:

$$E_{\text{зв}} = [Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - (m_{\text{я}} + Zm_e)]c^2 = \\ = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a]c^2,$$

де m_H – маса атома водню, m_a – маса атома з порядковим номером Z і масовим числом A .

За деякими своїми характеристиками ядро атома схоже на краплю рідини. Виходячи з цієї аналогії К. Вейцеккер одержав напівемпіричну формулу енергії зв'язку ядра:

$$E_{\text{зв}} = \alpha_1 A - \alpha_2 (A - 2Z)^2 \cdot A^{-1} - \alpha_3 A^{2/3} - \alpha_4 Z^2 \cdot A^{-1/3} + \alpha_5 \delta \cdot A^{-3/4},$$

де $\alpha_1 = 15,75 \text{ MeV}$, $\alpha_2 = 23,7 \text{ MeV}$, $\alpha_3 = 17,8 \text{ MeV}$, $\alpha_4 = 0,710 \text{ MeV}$
 $\alpha_5 = 34 \text{ MeV}$, а $\delta = +1$ для парно-парних ядер, $\delta = 0$ для ядер з непарним A і
 $\delta = -1$ для непарно-непарних ядер.

Енергія зв'язку, а отже і стабільність ядер, залежить від декількох причин. Вона менша у випадку, коли кількість протонів і окремо кількість нейтронів у ядрі непарна, а також при значній різниці між кількістю протонів і нейтронів у ядрі. Енергія зв'язку більша у парно-парних ядер. Особливо стійкі ядра, у яких число протонів і число нейтронів становить 2, 8, 20, 50, 82 і 126. Ці числа одержали назву магічних.

3.1.6. Більшість ядер за формою близькі до кулі. Їх радіус визначається емпіричною формулою:

$$R = R_0 A^{1/3},$$

де A – масове число, а $R_0 = (1,2 \div 1,5) \cdot 10^{-15} \text{ м}$.

Це означає, що радіуси атомних ядер знаходяться в межах від 10^{-15} до 10^{-14} м .

3.1.7. Окремо взяті протони і нейтрони мають власний момент імпульсу – спин $s = \frac{1}{2}$ (в одиницях \hbar). Рухаючись в ядрі, нуклони набувають також і орбітального моменту імпульсу l . Повний момент імпульсу нуклона L може бути $L = l + \frac{1}{2}$ або $L = l - \frac{1}{2}$. Момент імпульсу цілого ядра дорівнює векторній сумі моментів імпульсів окремих нуклонів:

$$\vec{L} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \vec{L}_3 + \dots + \vec{L}_A,$$

де A – масове число.

Власні магнітні моменти протона і нейтрона відповідно дорівнюють:

$$\mu_p = 2,79276\mu_n \text{ і } \mu_n = -1,91315\mu_n,$$

де $\mu_n = \frac{eh}{2m_p} = 5,0505 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$ – ядерний магнетон, m_p – маса протона.

Магнітний момент цілого ядра

$$\mu = g_n \sqrt{J(J+1)} \cdot \mu_n,$$

де g_n – гіромагнітний множник для ядра, J – квантове число, яке визначає повний момент імпульсу ядра.

3.2. Радіоактивність

3.2.1. Під радіоактивністю розуміють такі перетворення ядер, при яких змінюється або Z , або N за час, більший 10^{-12} с .

Розрізняють наступні види радіоактивності: 1) α -розпад, 2) β -розпад (β^- , β^+ і K - захоплення), 3) поділ ядер, 4) протонна, 5) двопротонна.

3.2.2. Кількість радіоактивних ядер dN , що зазнають розпаду за час dt , пропорційна кількості наявних на час $t = 0$ ядер N :

$$dN = -\lambda N dt.$$

Кількість ядер N радіоактивного препарату, які не розпадуться за час t , визначається на основі закону радіоактивного розпаду:

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

де N_0 – число атомів у момент часу $t = 0$.

3.2.3. Величину λ називають сталою розпаду. Вона зв'язана з періодом піврозпаду T та середнім часом життя ядер τ :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{і} \quad \tau = \frac{1}{\lambda}.$$

3.2.4. Коли при розпаді ядер радіоактивного ізотопу (материнські ядра) виникають ядра іншого ізотопу (дочірні ядра), які також радіоактивні, то зміни з часом N_1 і N_2 будуть описуватися рівняннями:

$$dN_1 = -\lambda_1 N_1 dt \quad \text{та} \quad dN_2 = (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) dt.$$

Розв'язки цих рівнянь мають вигляд:

$$N_1 = N_{10} \cdot e^{-\lambda_1 t},$$

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} + (N_{20} - N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}) \cdot e^{-\lambda_2 t},$$

де N_{10} і N_{20} – початкові значення N_1 і N_2 материнських і дочірніх ядер.

У початковий момент, коли дочірні ядра ще не утворилися, $N_{20} = 0$. Тоді:

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} [1 - e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}] = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1 [1 - e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}].$$

У випадку, коли час життя материнських ядер значно більший часу життя дочірніх ядер ($\lambda_2 \ll \lambda_1$) і час спостереження незначний порівняно з T_1 ($t \ll T_1$), можна вважати $N_1 = \text{const}$. Тоді

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1 [1 - e^{-\lambda_2 t}].$$

За малий, порівняно T_1 , проміжок часу t вираз $e^{-\lambda_2 t}$ стане значно меншим одиниці. Тоді

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (\text{наступає насичення}).$$

Останнє рівняння називають рівнянням «вікової» рівноваги між материнською та дочірньою речовинами.

3.2.5. Характеристикою радіоактивних речовин є їх активність A :

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

де N_0 – число ядер у початковий момент; N – число ядер, що залишилися через час t ; λ – стала розпаду; T – період піврозпаду; A_0 – початкова активність.

Питома активність радіоактивного препарату визначається числом розпадів за 1 c / 1 кг препарату.

3.2.6. Унаслідок віддачі, резонансне поглинання гама-квантів окремими ядрами неможливе: частину звільненої при гама-випромінюванні енергії забирає ядро (ефект Мессбауера). Тому енергія кванта, що випромінює збуджене ядро, становить:

$$h\nu_B \approx h\nu_0 \left(1 - \frac{h\nu_0}{2Mc^2}\right),$$

де $h\nu_0$ – енергія кванта у разі нехтування віддачею (енергія збудження); M – маса ядра.

Щоб відбулося резонансне поглинання, енергія гама-кванта повинна

бути

$$h\nu_{\Pi} \approx h\nu_0 \left(1 + \frac{h\nu_0}{2Mc^2}\right).$$

Різниця цих енергій $h\nu_{\Pi} - h\nu_B = \frac{(h\nu_0)^2}{2Mc^2}$ для резонансного поглинання не повинна перевищувати ширину спектральної лінії $\Gamma \approx \frac{\hbar}{\tau}$, де τ – час життя ядра у збудженому стані.

3.3. Ядерні реакції

3.3.1. Наслідок взаємодії ядра A з налітаючою частинкою a може мати наступні варіанти:

$$A + a \rightarrow \begin{cases} A + a \\ A^* + a \rightarrow A + a + \gamma \\ B + b \end{cases}$$

Перший результат є пружним розсіюванням, другий – непружне розсіювання. Ядерною реакцією є третій варіант.

Під час протікання ядерних реакцій мають місце закони збереження електричного заряду і масового числа.

3.3.2. Зміна енергії після протікання ядерної реакції визначається співвідношенням:

$$\Delta E = (\sum M_{\text{др}} - \sum M_{\text{пр}}) \cdot c^2,$$

де $\sum M_{\text{др}}$ – сума мас частинок до реакції; $\sum M_{\text{пр}}$ – сума мас частинок після реакції.

Якщо різниця мас виявляється додатною ($\sum M_{\text{др}} > \sum M_{\text{пр}}$), то енергія виділяється (екзотермічна реакція). При ($\sum M_{\text{др}} < \sum M_{\text{пр}}$) має місце ендотермічна реакція.

3.3.3. Для здійснення ядерної реакції необхідно, щоб налітаюча частинка володіла певною енергією – порогом реакції $T_{\text{пор}}$:

$$T_{\text{пор}} = |\Delta E| \left(1 + \frac{m_1}{m_2} + \frac{|\Delta E|}{2m_2 c^2}\right),$$

де m_1 і m_2 – маси відповідно налітаючої частинки і мішені.

Якщо $\Delta E \ll m_1 c^2$ і $\Delta E \ll m_2 c^2$ (нерелятивістський випадок):

$$T_{\text{пор}} = |\Delta E| \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right).$$

3.4. Ділення та синтез атомних ядер

3.4.1. Важкі ядра, які перенасичені нейтронами, схильні до поділу або самодовільно (спонтанно), або вимушено – при бомбардуванні їх нейтронами.

При поділі утворюються два осколки, для яких відношення $A_1/A_2 \approx 2/3$. Тобто $A_1 = (2/5)A$ і $A_2 = (3/5)A$. Енергія зв'язку, що припадає на один нуклон таких ядер, становить біля $8,5 \text{ MeV}$. Питома ж енергія зв'язку материнського ядра приблизно $7,6 \text{ MeV}$. Різниця енергій при поділі звільнюється.

Наприклад, при поділі U_{92}^{238} ця енергія становить:

$$E \approx (8,5 - 7,6) \cdot 238 \text{ MeV} \approx 200 \text{ MeV}.$$

При вимушеному поділі, після захоплення ядром нейтрона, спочатку утворюється так зване складене ядро, яке зазнає поділу через певний проміжок часу.

Енергія збудження складеного ядра $E_{зб} = T + E_{зв}$, де T – кінетична енергія частинки, яка налітає на ядро; $E_{зв}$ – енергія зв'язку цієї частинки в складеному ядрі.

У випадку ланцюгової ядерної реакції поділу коефіцієнт розмноження нейтронів визначається виразом:

$$K = \frac{N_i}{N_{i-1}},$$

де N_i – кількість нейтронів на даній стадії реакції, а N_{i-1} – кількість нейтронів на попередній стадії.

3.4.2. При високих температурах ($10^8 \div 10^9 \text{ K}$) можливе протікання реакції синтезу – злиття атомних ядер. Поки що такі термоядерні реакції мають некерований характер (воднева бомба). Для протікання керованого синтезу необхідно забезпечити певні умови (критерії Лоусона):

- 1) $T \approx 10^8 \text{ K}$
- 2) $n\tau \geq 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$
- 3) $\tau \geq 10 \text{ с}$

де n – концентрація плазми (кількість ядер в одиниці об'єму), τ – середній час утримання плазми в активній зоні реактора.

Здійснення керованого термоядерного синтезу передбачається проектом ITER.

3.5. Взаємодія ядерного випромінювання з речовиною

3.5.1. Максимальна втрачена енергія нейтрона при пружному розсіянні на ядрі:

$$E_{max} = \frac{4A}{(1+A)^2} E_0,$$

де E_0 – початкова енергія нейтрона, A – масове число ядра.

Енергія, втрачена нейтроном при розсіянні на довільний кут:

$$E = E_{max} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

3.5.2. Поглинання речовиною вузького моноенергетичного пучка гама-квантів:

$$I = I_0 e^{-\mu d} = I_0 \exp(-\mu d).$$

де I_0 – початкова інтенсивність пучка, d – глибина проникнення квантів у речовину, μ – лінійний коефіцієнт поглинання, який залежить від довжини хвилі і густини речовини ($\mu = \mu_m \cdot \rho$), μ_m – масовий коефіцієнт поглинання.

Через лінійний коефіцієнт поглинання визначається товщина шару половинного ослаблення:

$$\frac{1}{2} I_0 = I_0 \exp(-\mu d_{\frac{1}{2}});$$

Звідки

$$d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu}.$$

3.5.3. Кількісною характеристикою дії радіоактивного випромінювання на речовину є доза. Розрізняють експозиційну, поглинуту та еквівалентну дози.

Експозиційна доза опромінення:

$$D_{\text{експ}} = \frac{dE}{dV},$$

де E – енергія іонізуючого випромінювання, V – об'єм тіла, що опромінюється.

Вимірюється експозиційна доза позасистемною одиницею – рентгеном R .

Один рентген $1R = 1,14 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^3$. Потужність експозиційної дози

$$P_{\text{експ}} = \frac{dD_{\text{експ}}}{dt}.$$

Поглинута доза

$$D_{\text{погл}} = \frac{dE}{dm},$$

де m – маса тіла, що опромінюється.

Одиницею поглинутої дози є греї $Гр$. $1 Гр = 1 \text{ Дж/кг}$. Позасистемною одиницею є $рад$. $1 рад = 0,01 Гр$.

Еквівалентна доза

$$D_{\text{екв}} = KD_{\text{погл}}$$

де K – коефіцієнт, який залежить від виду опромінення: $K=1,0$ для γ і β - променів; $K= 10$ для α - частинок; $K=20$ для швидких нейтронів.

Одиницею еквівалентної дози в СІ є зіверт $Зв$. Біологічний еквівалент рентгена $бер = 0,01 Зв$. Крім того, оди Кюрі $1 Ки = 3,7 \cdot 10^{10}$ розп/с.

3.6. Методи дослідження у ядерній фізиці

3.6.1. При взаємодії налітаючої зарядженої частинки з атомним ядром кут розсіяння визначається співвідношенням:

$$ctg \frac{\theta}{2} = \frac{T}{U},$$

де T – кінетична енергія частинки відносно розсіювача, U – потенціальна енергія частинки у полі ядра із зарядом Ze для прицільної відстані ρ : $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze q}{\rho}$ (q – заряд налітаючої частинки).

Кількість частинок dN , що розсіялися на одному ядрі у тілесний кут $d\Omega$:

$$dN = N_0 \left(q \frac{Ze}{8\pi\epsilon_0 m v^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (\text{формула Резерфорда}),$$

де θ – кут розсіяння; $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$; m – маса частинки; v – швидкість частинки; N_0 – кількість налітаючих частинок, яка припадає на одиничну площадку, зорієнтовану перпендикулярно до потоку частинок.

Величина

$$d\sigma = \frac{dN}{N_0} = \left(q \frac{Ze}{8\pi\epsilon_0 m v^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

носить назву диференціальний ефективний переріз розсіювання.

3.6.2. Довжина пробігу протонів з енергією близько 1 MeV у повітрі визначається емпіричним виразом:

$$R_p = 1,93 T_p^{1,5},$$

де T_p – кінетична енергія протонів у MeV . R_p визначається у см .

Довжина пробігу будь-якої частинки з масою m , зарядом Ze та кінетичною енергією T у повітрі виражається через довжину пробігу протона у повітрі R_p :

$$R = \frac{m}{Z^2 m_p} \cdot R_p$$

R_p визначається при енергії $T_p = \frac{m_p}{m} \cdot T$.

Довжина пробігу частинки у речовині, густина якої ρ та молярна маса M :

$$R = R_n \frac{\rho_n}{\rho} \sqrt{\frac{M}{M_n}},$$

де R_n , ρ_n та M_n – відповідно пробіг частинки у повітрі, густина повітря та молярна маса повітря.

3.6.3. Рух частинки масою m і зарядом q у циклотроні відбувається з циклічною частотою

$$\omega = \frac{qB}{m} \text{ і періодом } T = \frac{2\pi m}{qB},$$

де B – індукція зовнішнього магнітного поля.

3.7. Характеристики частинок високих енергій

3.7.1. Основні характеристики елементарних частинок

Характеристика	Позначення	Характеристика	Позначення
Маса	m	Дивність	S
Електричний заряд	q	Чарівність (шарм)	C'
Перший лептонний заряд	L_e	Краса (привабливість)	B'
Другий лептонний заряд	L_μ	Істина	T'
Третій лептонний заряд	L_τ	Внутрішня парність	P
Баріонний заряд	B	Зарядова парність	C
Ізотопічний заряд	T	G-парність	G
Спін	s	Час життя	τ
Проекція T на вісь квантування	T_z	Колір	r у b

3.7.2. Характеристики лептонів

Лептон	m , MeV	q	L_e	L_μ	L_τ	B	T	s	T_z	S	C'	B'	T'	колір
$e^- (e^+)$	0,510	-1(+1)	+1(-1)	0	0	0	0	1/2	0	0	0	0	0	0
$\nu_e (\bar{\nu}_e)$	0	0	+1(-1)	0	0	0	0	1/2	0	0	0	0	0	0
$\mu^- (\mu^+)$	106	-1(+1)	0	+1(-1)	0	0	0	1/2	0	0	0	0	0	0
$\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$	0	0	0	+1(-1)	0	0	0	1/2	0	0	0	0	0	0
$\tau^- (\tau^+)$	1784	-1(+1)	0	0	+1(-1)	0	0	1/2	0	0	0	0	0	0
$\mu_\tau (\bar{\mu}_\tau)$	0	0	0	0	+1(1)	0	0	1/2	0	0	0	0	0	0

3.7.3. Характеристики кварків

Кварки	m, MeV	q	L_e	L_μ	L_τ	B	T	s	T_z	S	C'	B'	T'	колір
$u(\bar{u})$	7 (330)	$+\frac{2}{3}$ $(-\frac{2}{3})$	0	0	0	$+\frac{1}{3}$ $(-\frac{1}{3})$	1/2	1/2	$+\frac{1}{2}$ $(-\frac{1}{2})$	0	0	0	0	ryb
$d(\bar{d})$	15 (330)	$-\frac{1}{3}$ $(+\frac{1}{3})$	0	0	0	$-\frac{1}{3}$ $(+\frac{1}{3})$	1/2	1/2	$+\frac{1}{2}$ $(-\frac{1}{2})$	0	0	0	0	ryb
$c(\bar{c})$	$1,3 \cdot 10^3$	$+\frac{2}{3}$ $(-\frac{2}{3})$	0	0	0	$+\frac{1}{3}$ $(-\frac{1}{3})$	0	1/2	0	0	+1 (-1)	0	0	ryb
$s(\bar{s})$	200 (500)	$-\frac{1}{3}$ $(+\frac{1}{3})$	0	0	0	$-\frac{1}{3}$ $(+\frac{1}{3})$	0	1/2	0	+1 (-1)	0	0	0	ryb
$t(\bar{t})$	$4,8 \cdot 10^3$	$+\frac{2}{3}$ $(-\frac{2}{3})$	0	0	0	$+\frac{1}{3}$ $(-\frac{1}{3})$	0	1/2	0	0	0	0	+1 (-1)	ryb
$b(\bar{b})$	$(5 \cdot 10^3)$	$-\frac{1}{3}$ $(+\frac{1}{3})$	0	0	0	$-\frac{1}{3}$ $(+\frac{1}{3})$	0	1/2	0	0	0	+1 (-1)	0	ryb

У дужках вказані значення характеристик для античастинок та маси кварків у зв'язаному стані. Позначення кольорів кварків: r (*red*) – червоний, y (*yellow*) – жовтий, b (*blue*) – блакитний.

Істинно нейтральними вважаються частинки: $\gamma, \pi^0, \eta^0, J/\psi, \gamma$.

4. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

4.1. Оцінити густину ядерної речовини D , концентрацію нуклонів n , середню віддаль між ними $\langle r \rangle$ та об'єму густину електричного заряду ρ в ядрі.

Дано:

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

$$R_0 \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$D - ?$

$n - ?$

$\langle r \rangle - ?$

$\rho - ?$

Аналіз:

Густина ядерної речовини $D = M_{\text{я}}/V$, де $M_{\text{я}}$ – маса ядра, V – його об'єм.

Прийнявши, що ядро сфера, радіус якої

$R = R_0 \cdot A^{1/3}$, а A – масове число, одержуємо:

$$D = \frac{A \cdot m_p}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{A \cdot m_p}{\frac{4}{3}\pi (R_0 A^{1/3})^3} = \frac{A \cdot m_p}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 A} = \frac{m_p}{\frac{4}{3}\pi R_0^3}$$

Концентрація нуклонів у ядрі:

$$n = \frac{A}{V} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi (R_0 A^{1/3})^3} = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi R_0^3}$$

Середня відстань між нуклонами:

$$\langle r \rangle = \frac{1}{n^{1/3}}$$

Об'ємна густина електричного заряду у ядрі:

$$\rho = \frac{q}{V} = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi (R_0 A^{1/3})^3} = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 A} = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 (Z+N)} = \frac{e}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 (1+\frac{N}{Z})}$$

Для більшості ядер $\frac{N}{Z} \approx 1$. Тоді

$$\rho = \frac{e}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 \cdot 2}$$

Обрахунки:

$$D = \frac{1,67 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (1,4 \cdot 10^{-15})^3} = 1,45 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$$

$$n = \frac{1}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (1,4 \cdot 10^{-15})^3} = 8,7 \cdot 10^{43} \text{ м}^{-3}$$

$$\langle r \rangle = \frac{1}{\sqrt[3]{0,87 \cdot 10^{44}}} = 2,26 \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

$$\rho = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (1,4 \cdot 10^{-15})^3 \cdot 2} = 6,96 \cdot 10^{24} \text{ Кл/м}^3$$

Відповідь: густина ядерної речовини становить $1,45 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$,

концентрація нуклонів $8,7 \cdot 10^{43} \text{ м}^{-3}$, середня відстань між нуклонами $2,26 \cdot 10^{-15} \text{ м}$, густина електричного заряду $6,96 \cdot 10^{24} \text{ Кл/м}^3$

4.2. Питомі енергії зв'язку ядер ${}_3\text{Li}^6$ та ${}_3\text{Li}^7$ дорівнюють відповідно $5,33 \text{ MeV/нуклон}$ і $5,60 \text{ MeV/нуклон}$. Визначити маси цих нуклідів та відповідні атомні маси. Яке з вказаних ядер є більш стабільним?

Дано:

$$\varepsilon_1 = 5,33 \text{ MeV}$$

$$\varepsilon_2 = 5,60 \text{ MeV}$$

$$Z=3$$

$$A_1 = 6$$

$$A_2 = 7$$

$$m'_{\text{я}} - ?$$

$$m''_{\text{я}} - ?$$

$$m'_a - ?$$

$$m''_a - ?$$

Аналіз:

Питома енергія зв'язку ядра:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{зв}}}{A}, \text{ звідки } E_{\text{зв}} = \varepsilon \cdot A.$$

З іншого боку

$$E_{\text{зв}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}] \cdot c^2$$

тоді

$$\varepsilon A = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}] \cdot c^2$$

і

$$m_{\text{я}} = Zm_p + (A - Z)m_n - \frac{\varepsilon A}{c^2}.$$

Маса атома складається з маси ядра і електронів:

$$m_a = m_{\text{я}} + m_e.$$

У фізиці ядра маси визначають в *а.о.м.*

Обрахунки:

$$m'_{\text{я}} = 3 \cdot 1,00728 + (6 - 3) \cdot 1,00866 - \frac{5,33 \cdot 6}{931,5} = 6,01252 \text{ а.о.м.}$$

$$m''_{\text{я}} = 3 \cdot 1,00728 + (7 - 3) \cdot 1,00866 - \frac{5,60 \cdot 7}{931,5} = 7,01444 \text{ а.о.м.}$$

$$m'_a = 6,01252 + 3 \cdot 5,49 \cdot 10^{-4} = 6,01517 \text{ а.о.м.}$$

$$m''_a = 7,01444 + 3 \cdot 5,49 \cdot 10^{-4} = 7,01609 \text{ а.о.м.}$$

Відповідь: маси ядер ${}_3\text{Li}^6$ і ${}_3\text{Li}^7$ рівні відповідно $6,01252 \text{ а.о.м.}$ і $7,01444 \text{ а.о.м.}$; маси їх атомів становлять $6,01517 \text{ а.о.м.}$ і $7,01609 \text{ а.о.м.}$

Більш стабільним є ядро ${}_3\text{Li}^7$, оскільки енергія зв'язку в нього більша.

4.3. Користуючись формулою Вейцзеккера, обчислити енергію зв'язку протона E_p і альфа-частинки E_α в ядрі ${}_{92}\text{U}^{238}$ та зробити висновок щодо енергетичної доцільності розпаду цього ядра.

Дано:

${}_{92}\text{U}^{238}$

Аналіз

Формула Вейцзеккера має вигляд:

$$E_{\text{зв}} = \alpha_1 A - \alpha_2 (A - 2Z)^2 A^{-1} - \alpha_3 A^{2/3} - \alpha_4 Z^2 A^{-1/3} + \alpha_5 \delta A^{-3/4},$$

$E_p - ?$

де $\alpha_1 = 15,75 \text{ MeV}$, $\alpha_2 = 23,7 \text{ MeV}$, $\alpha_3 = 17,8 \text{ MeV}$, $\alpha_4 = 0,710$

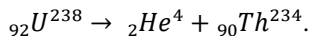
$E_\alpha - ?$

MeV , $\alpha_5 = 34 \text{ MeV}$. Оскільки A і Z числа парні, то $\delta = 1$.

Визначимо за цією формулою енергію зв'язку ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$:

$$E_{\text{зв}} = 15,75 \cdot 238 - 23,7 \cdot (238 - 184)^2 \cdot 238^{-1} - 17,8 \cdot 238^{2/3} - 0,710 \cdot 92^2 \cdot 238^{-1/3} + 34 \cdot 238^{-3/4} = 1810,78 \text{ MeV}.$$

Реакція α -розпаду ${}_{92}\text{U}^{238}$



Енергія зв'язку ${}_2\text{He}^4$:

$$15,74 \cdot 4 - 23,7(4 - 4)^2 \cdot 4^{-1} - 17,8 \cdot 4^{2/3} - 0,710 \cdot 2^2 \cdot 4^{-1/3} + 34 \cdot 4^{-3/4} = 28,18 \text{ MeV}.$$

Енергія зв'язку ${}_{90}\text{Th}^{234}$:

$$15,74 \cdot 234 - 23,7(234 - 180)^2 \cdot 234^{-1} - 17,8 \cdot 234^{2/3} - 0,710 \cdot 90^2 \cdot 234^{-1/3} + 34 \cdot 234^{-3/4} = 1782,09 \text{ MeV}.$$

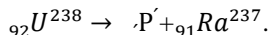
Тоді енергія зв'язку альфа-частинки у ядрі урану буде:

$$E_\alpha = 1782,09 + 28,18 - 1810,78 = -0,51 \text{ MeV}.$$

Це означає (знак $\sim -$), що ядро ${}_{92}\text{U}^{238}$ схильна до альфа-розпаду.

Проаналізуємо тепер можливість протонного розпаду ${}_{92}\text{U}^{238}$.

Можлива реакція



Енергія зв'язку ${}_{91}\text{Ra}^{237}$:

$$15,74 \cdot 237 - 23,7(237 - 182)^2 \cdot 237^{-1} - 17,8 \cdot 237^{2/3} - 0,710 \cdot 91^2 \cdot 237^{-1/3} + 34 \cdot 237^{-3/4} = 1804,46 \text{ MeV}.$$

Тоді $E_p = 1810,78 - 1804,46 = 6,32 \text{ MeV}$.

Енергія додатня і достатньо значна. Тому протонна радіоактивність у ${}_{92}\text{U}^{238}$ не спостерігається.

Відповідь: енергія зв'язку протона і альфа-частинки у ядрі ${}_{92}\text{U}^{238}$ відповідно $6,32 \text{ MeV}$ і $-0,51 \text{ MeV}$.

4.4. Довести, що вираз $\mu = q_{\text{я}}\sqrt{J(J+1)} \cdot \mu_{\text{я}}$ має розмірність магнітного моменту. Порівняти магнітні моменти атомів і атомних ядер. Чому при обчисленні магнітних моментів атомів ядерним внеском часто нехтують?

Дано:

$$\mu = q_{\text{я}}\sqrt{J(J+1)} \cdot \mu_{\text{я}}$$

$\mu_{\text{а}} - ?$

$\mu_{\text{я}} - ?$

Аналіз:

Магнітний момент, наприклад, колового струму $p_m = IS$. Вимірюється ця величина в Am^2 . Таким чином, у правій частині заданої рівності розмірність повинна бути Am^2 . Гіромагнітний множник $q_{\text{я}}$ – величина безрозмірна. Відсутня розмірність і у квантового числа J . Ядерний магнетон $\mu_{\text{я}} = \frac{eh}{2m_p}$, його розмірність $\text{Кл} \cdot \text{Дж} \cdot \text{с} / \text{кг} = \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{с}^2 \cdot \text{кг} = \text{Am}^2$, тобто розмірності

співпадають.

Магнітний момент електрона дорівнює магнетону Бора $\mu_{\text{Б}} = \frac{eh}{2m_e}$, а магнітний

момент ядра ядерному магнетону $\mu_{\text{я}} = \frac{eh}{2m_p}$. Звідки слідує, що $\mu_{\text{Б}} = 1836,5 \mu_{\text{я}}$.

Тобто магнітний момент ядра у 1836,5 разів менший магнітного момента електрона. Виходячи з цього, магнітним моментом ядра при визначенні сумарного моменту атома часто нехтують.

4.5. Скільки атомів полонію Po_{84}^{210} масою $5 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$ розпадається за 276 діб?

Дано:

$$t = 276 \text{ діб}$$

$$T = 138 \text{ діб}$$

$$m = 5 \cdot 10^{-3} \text{ г}$$

$N - ?$

СІ

$$5 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$$

Аналіз

Закон радіоактивного розпаду має вигляд:

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

де N_0 – число атомів у момент часу $t = 0$;

N – кількість ядер, які ще не розпалися за час t ; λ – стала розпаду, яка зв'язана з

періодом піврозпаду T : $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$.

Число атомів, що розпалися за час t буде:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = N_0(1 - e^{-\lambda t}) = N_0 \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{T} t}\right) = N_0 \left[1 - (e^{\ln 2})^{-\frac{t}{T}}\right] = N_0(1 - 2^{-\frac{t}{T}}).$$

Початкова кількість атомів визначається через число Авогадро:

$$N_0 = \frac{m}{A} \cdot N_A,$$

де $\frac{m}{A}$ – число кілограм-атомів.

Тоді

$$\Delta N = \frac{m}{A} \cdot N_A(1 - 2^{-\frac{t}{T}}).$$

Значення $T=138$ діб – таблична величина.

Обрахунки:

$$\Delta N = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{210} \cdot 6,02 \cdot 10^{26} \cdot \left(1 - 2^{-\frac{276}{138}}\right) = 1,07 \cdot 10^{19} \text{ атомів}$$

Відповідь: за 276 діб розпалося $1,07 \cdot 10^{19}$ атомів полонію.

4.6. Внаслідок радіоактивного розпаду ядер нукліда A_1 утворюється нуклід A_2 . Сталі розпадів ядер цих нуклідів відповідно λ_1 та λ_2 . У початковий момент часу в препараті перебуває лише нуклід A_1 з кількістю ядер N_{10} . Визначити кількість ядер N_2 нукліда A_2 через проміжок часу t , а також проміжок часу t_1 , через який кількість ядер нукліда A_2 досягає максимального значення.

Дано:

A_1

A_2

λ_1

λ_2

N_{10}

t

$N_2 - ?$

$t_1 - ?$

Аналіз:

Позначимо число материнських ядер через N_1 , а число дочірних ядер, які виникли у результаті розпаду нукліда A_1 , через N_2 . Тоді зміни N_1 і N_2 за час dt будуть: $\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$; $\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$.

Будемо вважати, що ядра, які утворилися при розпаді нуклідів A_2 є стабільними, тобто онучаті, відносно нукліда A_1 , ядра вже не розкладаються. Тоді розв'язок системи із двох вище записаних рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} N_1 = N_{10} \cdot e^{-\lambda_1 t}. \\ N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} + (N_{20} - N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}) e^{-\lambda_2 t}. \end{cases}$$

Тут N_{20} – початкова кількість (при $t = 0$) ядер нукліда A_2 . За умовою задачі $N_{20} = 0$. Тоді

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}).$$

Для визначення t_1 останній вираз слід дослідити на максимум, тобто взяти похідну по часу і привіняти її до нуля:

$$N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_1} + \lambda_2 e^{-\lambda_1 t_1}) = 0.$$

$N_{10} \neq 0, \lambda_1 \neq 0$ і $\lambda_2 \neq 0$. Тоді

$$-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_1} + \lambda_2 e^{-\lambda_1 t_1} = 0$$

Після логарифмування одержуємо:

$$\ln \lambda_1 - \lambda_1 t_1 = \ln \lambda_2 - \lambda_2 t_1.$$

Звідки

$$t_1 = \frac{\ln(\lambda_1/\lambda_2)}{\lambda_1 - \lambda_2}.$$

Відповідь: кількість ядер N_2 нукліда A_2 через час t після початку спостереження

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}).$$
 Кількість ядер нукліда A_2

$$\text{досягне максимуму через час } t_1 = \frac{\ln(\lambda_1/\lambda_2)}{\lambda_1 - \lambda_2}.$$

4.7. В 1 т природного граніту міститься $m_1 = 3$ з суміші нуклідів урану в складі 99,3% U^{238} і 0,7% U^{235} та $m_2 = 12$ з нукліда Th^{232} . Визначити початкову активність кожного з нуклідів, що містяться в 1 з граніту, та повну початкову активність цієї маси граніту.

Дано:	СІ	Аналіз
$m = 1$ т	10^3 кг	Активність нукліда визначається кількістю ядер, що розпадаються за одиницю часу:
$m_1 = 3$ з	$3 \cdot 10^{-3}$ кг	
$m_2 = 12$ з	$12 \cdot 10^{-3}$ кг	$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N.$
${}_{90}Th^{232}$.		У масі m_1 знаходиться $m' = m_1 \cdot 0,993$ урану ${}_{92}U^{238}$ і $m'' = m_1 \cdot 0,007$ урану ${}_{92}U^{235}$, Тоді
$A_1 - ?$		$A_1 = \frac{m'}{\mu_1} \cdot N_A \cdot \lambda_1 = \frac{m'}{\mu_1} \cdot N_A \cdot \frac{\ln 2}{T_1},$
$A_2 - ?$		$A_2 = \frac{m''}{\mu_2} \cdot N_A \cdot \frac{\ln 2}{T_2},$
$A_3 - ?$		$A_3 = \frac{m_2}{\mu_3} \cdot N_A \cdot \frac{\ln 2}{T_3},$
$A - ?$		

де μ_1, μ_2, μ_3 – молекулярні ${}_{92}U^{238}, {}_{92}U^{235}$ і ${}_{90}Th^{232}$;

T_1, T_2 і T_3 – періоди піврозпаду цих нуклідів;

N_A – число Авогадро.

За табличними даними $T_1 = 4,5 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600$ с, $T_2 = 7,1 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600$ с, $T_3 = 1,41 \cdot 10^{10} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600$ с.

Обрахунки:

$$A_1 = \frac{2,979 \cdot 10^{-3}}{238} \cdot 6,02 \cdot 10^{26} \cdot \frac{0,693}{4,5 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ розпадів/с,}$$

$$A_2 = \frac{0,021 \cdot 10^{-3}}{235} \cdot 6,02 \cdot 10^{26} \cdot \frac{0,693}{7,1 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 1,67 \cdot 10^4 \text{ розпадів/с,}$$

$$A_3 = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{232} \cdot 6,02 \cdot 10^{26} \cdot \frac{0,693}{1,41 \cdot 10^{10} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 4,91 \cdot 10^4 \text{ розпадів/с,}$$

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = (3,7 + 1,67 + 4,91) \cdot 10^{10} = 10,28 \cdot 10^4 \text{ розпадів/с.}$$

Оскільки $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ розпадів/с}$, то $A_1 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ки} = 1 \text{ мКи}$;

$$A_2 = 0,45 \text{ мКи}; A_3 = 1,32 \text{ мКи}; A = 2,77 \text{ мКи}.$$

Відповідь: початкова активність нукліда U^{238} становить 1 мКи , нукліда U^{235} – $0,45 \text{ мКи}$, нукліда Th^{232} – $1,32 \text{ мКи}$. Загальна активність була $2,77 \text{ мКи}$.

4.8. Хворому увели внутрішньовенно 1 см^3 розчину, що містить штучний радіоізоотоп натрію ${}_{11}\text{Na}^{24}$ активністю $A = 2000 \text{ с}^{-1}$. Активність 1 см^3 крові, взятої через 5 год. , виявилася $a = 0,27 \text{ с}^{-1}$. Визначити об'єм крові хворого.

Дано:

$$A = 2000 \text{ с}^{-1}$$

$$a = 0,27 \text{ с}^{-1}$$

$$t = 5 \text{ год.}$$

$V = ?$

Аналіз:

Один кубічний сантиметр радіоактивного натрію розчинився у V кубічних сантиметрах крові хворого. Це означає, що 1 см^3 крові у момент часу $t = 0$ мав активність $a_0 = \frac{A}{V}$. Через проміжок часу t його активність знизилась до a . Зменшення активності підпорядковане закону:

$$a = a_0 e^{-\lambda t} = a_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t} = \frac{A}{V} e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

Звідки

$$V = \frac{A}{a} e^{-\frac{\ln 2}{T} t}.$$

Обрахунки:

$$V = \frac{2000}{0,27} \cdot e^{-\frac{0,693}{15,3} \cdot 5} \approx 5950 \text{ см}^3$$

Відповідь: об'єм крові людини біля 6000 см^3 .

4.9. Ядро ${}_{83}\text{Bi}^{210}$, енергія зв'язку якого $E_{361} = 1644,8 \text{ MeV}$, що перебуває у спокої, зазнає бета-розпаду. Для утвореного внаслідок розпаду ядра енергія зв'язку $E_{362} = 1645,2 \text{ MeV}$. Визначити енергію розпаду Q та енергію ε

електронного антинейтрино, якщо кінетична енергія електрона $T_e = 0,33 \text{ MeV}$. Чому дорівнює максимальне значення цієї енергії ε_{max} для вказаного розпаду? Віддачею ядра, утвореного внаслідок розпаду, нехтувати.

Дано:



$$E_{\alpha 1} = 1644,8 \text{ MeV}$$

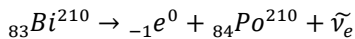
$$E_{\alpha 2} = 1645,2 \text{ MeV}$$

$$T_e = 0,33 \text{ MeV}$$

$$Q = ? \quad \varepsilon = ? \quad \varepsilon_{max} = ?$$

Аналіз:

Запишемо реакцію бета-розпаду ядра ${}_{83}\text{Bi}^{210}$:



При бета-розпаді нейтрон перетворюється у протон.

При цьому виділяється енергія $(m_n - m_p)c^2$.

Тоді енергія розпаду буде:

$$Q = (m_n - m_p)c^2 + E_{\alpha 2} - E_{\alpha 1}$$

Ця енергія розподіляється між електроном та антинейтрино (при нехтуванні віддачею ${}_{84}\text{Po}^{210}$). Тобто $Q = T_e + \varepsilon$.

Звідки

$$\varepsilon = Q - T_e$$

Максимальне значення ε буде тоді, коли $T_e = 0$.

Обрахунки:

$$Q = (1,00866 - 1,00728) \cdot 931,6 + 1645,2 - 1644,8 = 1,686 \text{ MeV}$$

$$\varepsilon = 1,686 - 0,330 = 1,356 \text{ MeV}$$

$$\varepsilon_{max} = 1,686 \text{ MeV}$$

Відповідь: енергія бета-розпаду ${}_{83}\text{Bi}^{210}$ становить $1,686 \text{ MeV}$, енергія антинейтрино $1,356 \text{ MeV}$, максимальна енергія антинейтрино $1,686 \text{ MeV}$.

4.10. Енергія першого збудженого рівня ядра атома іридія ${}_{77}\text{Ir}^{191}$ $E = 129 \text{ KeV}$, час його життя $\tau = 10^{-10} \text{ c}$. Чи можливе резонансне поглинання цим ядром гама-квантів з такою енергією?

Дано:



$$E = 129 \text{ KeV}$$

$$\tau = 10^{-10} \text{ c}$$

$$\Gamma = ?$$

Аналіз

Резонансне поглинання можливе лише у випадок, коли різниця енергій падаючого кванта і кванта випромінювання не перевищує ширину спектральної лінії Γ , яка визначається із нерівності Гейзенберга:

$$\Delta E \cdot \tau \geq \hbar$$

$$\Delta E = \Gamma \geq \frac{\hbar}{\tau}$$

При переході ядра із збудженого стану у стаціонарний звільняється енергія, яка дорівнює різниці енергій у збудженому і стаціонарному стані: $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$. Частина цієї енергії витрачається на випромінення ($h\nu_B$), частина – на надання кінетичної енергії ядру ($Mv^2/2$), яке зазнає віддачу. При цьому мають місце закони збереження енергії та імпульсу:

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \varepsilon_1 + h\nu_B + Mv^2/2; \\ \frac{h\nu_B}{c} &= Mv. \end{aligned}$$

При поглинанні ядром гама-кванта закони збереження матимуть вигляд:

$$h\nu_{\Pi} + \varepsilon_1 = \varepsilon_2 + \frac{Mv_1^2}{2}, \quad \frac{h\nu_{\Pi}}{c} = Mv_1.$$

де v_1 – швидкість ядра після поглинання гама-кванта.

З цих двох систем рівнянь знаходимо:

$$h\nu_B = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{1 + \frac{h\nu_B}{2Mc^2}}; \quad h\nu_{\Pi} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{1 - \frac{h\nu_{\Pi}}{2Mc^2}},$$

Позначимо $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = h\nu_0$. Така частота ν_0 мала б місце, якби віддачі не було. Ясно також, що $h\nu_0 \ll Mc^2$ і зміна енергії гама-кванта внаслідок віддачі також мала, порівняно з Mc^2 . Тоді

$$\begin{aligned} h\nu_B &\approx h\nu_0 \left(1 - \frac{h\nu_0}{2Mc^2}\right); \\ h\nu_{\Pi} &= h\nu_0 \left(1 + \frac{h\nu_0}{2Mc^2}\right). \end{aligned}$$

Звідки

$$h\nu_{\Pi} - h\nu_B = \frac{(h\nu_0)^2}{Mc^2}.$$

Обрахунки:

$$\Gamma \geq \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{10^{-10} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 6,6 \cdot 10^{-9} eB$$

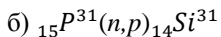
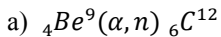
$$h\nu_{\Pi} - h\nu_B = \frac{(129 \cdot 10^3)^2}{191 \cdot 931,6 \cdot 10^6} = 0,094 eB$$

Відповідь: як бачимо, $h\nu_{\Pi} - h\nu_B$ значно перевищує природну ширину збудженого рівня ΔE . Тобто, дійсно резонансне поглинання гама-квантів ядрами не відбуватиметься.

4.11. Чи відбуваються у природних умовах реакції:

а) ${}^4_2\text{Be}^9(\alpha, n) {}^6_3\text{C}^{12}$; б) ${}^{31}_{15}\text{P}^{31}(n, p) {}^{31}_{14}\text{Si}^{31}$?

Дано:

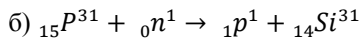
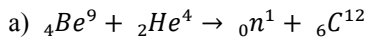


$\Delta E_\alpha - ?$

$\Delta E_\beta - ?$

Аналіз:

Схеми протікання реакцій:



Природним шляхом можуть відбуватися лише реакції з виділенням енергії – екзотермічні. Тому потрібно визна-

чити енергію реакції. Якщо вона буде додатня, то реакція можлива у природних умовах. У свою чергу енергія буде додатня, коли $\Delta m > 0$.

У випадку а) дефект маси становить:

$\Delta m_\alpha = (9,009973 + 4,002596) - (1,008665 + 12,000000) = 0,003904 \text{ а.о.м.}$

У випадку б) дефект маси буде:

$\Delta m_\beta = (30,973762 + 1,008665) - (1,007285 + 30,975350) = -0,000208 \text{ а.о.м.}$

Обрахунки:

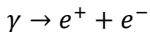
$\Delta E_\alpha = \Delta m_\alpha \cdot 931,6 = 0,003904 \cdot 931,6 = 3,637 \text{ MeB.}$

$\Delta E_\beta = \Delta m_\beta \cdot 931,6 = -0,000208 \cdot 931,6 = -0,194 \text{ MeB.}$

Перша реакція може відбуватися у природних умовах, друга – ні.

4.12. Обчислити поріг та енергію реакції $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$, якщо вона відбувається внаслідок зіткнення γ -кванта з електроном.

Дано:



$T_{пор} - ?$

$\Delta E - ?$

Аналіз:

Енергія ядерної реакції

$\Delta E = (\Sigma M_{\partial p} - \Sigma M_{np}) \cdot c^2$

де $\Sigma M_{\partial p}$ – сума мас спокою частинок до реакції;

ΣM_{np} – сума мас спокою частинок, які утворилися внаслідок реакції.

Оскільки маса спокою γ -кванта нульова, то $\Sigma M_{\partial p} = 0$. Тоді:

$\Delta E = -2m_e \cdot c^2.$

Знак «мінус» вказує на ендотермічність реакції.

Поріг реакції для нашого (нерелятивістського) випадку визначається за формулою:

$T_{пор} = |\Delta E| \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right),$

де m_1 – маса налітаючої частинки, а m_2 – маса мішені.

Відповідно до умови задачі $m_1 = m_e$ і $m_2 = m_e$. Тоді

$$T_{\text{пор}} = |\Delta E| \cdot 2.$$

Обрахунки:

$$\Delta E = -2 \cdot 0,51 \text{ MeV} = -1,02 \text{ MeV}$$

$$T_{\text{пор}} = 1,02 \cdot 2 = 2,04 \text{ MeV}.$$

Відповідь: енергія реакції становить $-1,02 \text{ MeV}$, поріг реакції $2,04 \text{ MeV}$.

4.13. Час τ , за який потужність реактора на повільних нейтронах зростає в $e = 2,718$ разів, називають періодом ланцюгової реакції. Чому дорівнює коефіцієнт розмноження нейтронів K у цьому реакторі, якщо для нього $\tau = 10 \text{ с}$, а час життя покоління нейтронів $T = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$?

Дано:

$$\tau = 10 \text{ с},$$

$$T = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$e = 2,718 \text{ разів}$$

$K = ?$

Аналіз:

Оскільки нейтрони з'являються у результаті радіоактивного розпаду ядер, який відбувається за законом:

$$dN = -\lambda N dt,$$

то і поява нейтронів підпорядкована такій же закономірності, з тією відмінністю, що у випадку нейтронів їх приріст буде додатнім. Крім того, сталу λ слід записати через період ланцюгової реакції τ .

$$\text{Тоді } dn = \frac{1}{\tau} \cdot n \cdot dt. \text{ Звідки } \frac{dn}{n} = \frac{1}{\tau} dt.$$

При інтегруванні цього рівняння слід врахувати, що за час життя одного покоління нейтронів (dt змінюється від 0 до T) кількість нейтронів зростає від n_{i-1} до n_i ($K = \frac{n_i}{n_{i-1}}$).

Інтегруємо диференціальне рівняння:

$$\ln n_i = \frac{1}{\tau} T + C.$$

Константу C знаходимо з умови, що при $T=0$ $n = n_{i-1}$;

$$\ln n_{i-1} = C, \text{ тоді } \ln n_i = \frac{T}{\tau} + \ln n_{i-1}, \text{ або}$$

$$\ln \frac{n_i}{n_{i-1}} = \frac{T}{\tau}; \ln K = \frac{T}{\tau}. \text{ Звідки } K = e^{T/\tau}.$$

Обрахунки:

$$K = e^{5 \cdot 10^{-4} / 10} = e^{5 \cdot 10^{-5}} = 1,00005.$$

Відповідь: коефіцієнт розмноження нейтронів дуже близький до одиниці – реактор працює в критичному режимі.

4.14. Реактор на швидких нейтронах потужністю $P = 100 \text{ MBT}$

відтворює плутоній. При поділі одного ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$ у середньому утворюється $n = 2,5$ нейтронів і виділяється енергія $E_0 = 200 \text{ MeV}$. Навести низку ядерних реакцій, які відбуваються в активній зоні реактора під час утворення плутонію. Визначити масу m_{Pu} плутонію, утвореного в реакторі за $t = 10 \text{ діб}$ та порівняти її з масою m_u витраченого пального.

Дано:	СІ	Аналіз:
$P = 100 \text{ MBT}$	$100 \cdot 10^6 \text{ BT}$	У реакторах на швидких нейтронах ${}_{92}\text{U}^{238}$ можна перетворити на ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ за такою схемою:
$n = 2,5$	$3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$	
$E_0 = 200 \text{ MeV}$	864000 c	
$t = 10 \text{ діб}$		
$m_{Pu} - ?$		${}_{92}\text{U}^{238} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{92}\text{U}^{239} + \gamma;$
$m_u - ?$		${}_{92}\text{U}^{239} \rightarrow {}_{93}\text{Np}^{239} + {}_{-1}e^0 + \tilde{\nu};$
		${}_{93}\text{Np}^{239} \rightarrow {}_{94}\text{Pu}^{239} + {}_{-1}e^0 + \tilde{\nu}.$

Із n нейтронів на таке перетворення витрачається $(n - 1)$ нейтрон – один нейтрон ділить ядро ${}_{92}\text{U}^{235}$ зі звільненням E енергії.

Для одержання Pt енергії потрібна слідуєча маса ${}_{92}\text{U}^{235}$:

$$Pt = E \frac{m_u}{M_u} \cdot N_A, \text{ звідки } m_u = \frac{PtM_u}{EN_A},$$

де M_u – масове число урана, N_A – число Авогадро.

Кількість утворених ядер ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ у $(n - 1)$ разів більша кількості поділених ядер ${}_{92}\text{U}^{235}$. Маса одного ядра ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ більша за масу одного ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$ у $\frac{M_{Pu}}{M_u}$ разів. Тоді маса утвореного плутонію буде:

$$m_{Pu} = m_u(n - 1) \frac{M_{Pu}}{M_u}.$$

Обрахунки:

$$m_u = \frac{10^8 \cdot 864000 \cdot 235}{3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{26}} = 1,054 \text{ кг}$$

$$m_{Pu} = 1,054(2,5 - 1) \frac{239}{238} = 1,588 \text{ кг}$$

Відповідь: оскільки $m_{Pu} > m_u$, то відбувається розширене відтворення пального.

4.15. Оцінити температуру T , необхідну для протікання термоядерної реакції синтезу дейтретію і тритію. Визначити кількість енергії, яка виділяється при утворенні 1 г гелію.

Дано:	СІ	Аналіз:
${}_1D^2$		Реакція синтезу дейтерію і тритію з утворенням гелію
${}_1T^3$		протікає за схемою:
$m = 1 \text{ г}$	10^{-3} кг	${}_1D^2 + {}_1T^3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1.$
$T - ?$		Для синтезу ядер потрібно подолати кулонівський
$E - ?$		бар'єр відштовхування однойменно заряджених ядер:
		$\frac{Z_1 e_1 Z_2 e}{4\pi\epsilon_0 r}.$

У випадку ізотопів водню $Z_1 = Z_2 = 1$, а $r \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ м}$.

Цей бар'єр можна подолати, надавши ядрам, шляхом їх нагрівання, кінетичної енергії $\frac{3}{2} kT$ (k – стала Больцмана). Тоді

$$\frac{3}{2} k T \approx \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \text{ Звідки } T = \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r \cdot K \cdot 3}.$$

При утворенні одного ядра гелію виділяється енергія:

$$E_0 = [m_D + m_T] - (m_{He} + m_n)]c^2$$

При утворенні гелію, масою m , звільнена енергія становитиме:

$$E = \frac{m}{M_{He}} \cdot N_A \cdot E_0.$$

Обрахунки:

$$T = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 2}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-15} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3} = 2 \cdot 10^9 K.$$

$$E = \frac{10^{-3}}{4} \cdot 6,02 \cdot 10^{26} [(2,01474 + 3,01700) - (4,00388 + 1,00899)] 931,6 = \\ = 26,5 \cdot 10^{23} MeV = 42,38 \cdot 10^4 Дж = 11,8 \cdot 10^4 кВт \cdot год.$$

Відповідь: для протікання термоядерної реакції синтезу необхідна температура близько $10^9 K$. При одержанні л γ гелію виділяється енергія $11,8 \cdot 10^4 кВт \cdot год$.

4.16. Визначити лінійні коефіцієнти поглинання вузького пучка γ -квантів, енергія яких $\varepsilon_\gamma = 3 MeV$, у воді μ_1 та свинці μ_2 , якщо відстані, на яких потік цих квантів зменшується в $K=10$ разів, дорівнюють відповідно $l_1 = 0,58$ м та $l_2 = 4,9 \cdot 10^{-2}$ м.

Дано:

$$\varepsilon_\gamma = 3 MeV \\ l_1 = 0,58 \text{ м} \\ l_2 = 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ K=10 \\ \mu_1 - ? \\ \mu_2 - ?$$

Аналіз:

Поглинання вузького пучка монохроматичного γ -випромінювання визначається формулою:

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

де I_0 та I – інтенсивності пучка відповідно до поглинання та після поглинання, μ – лінійний коефіцієнт поглинання, d – глибина проникнення γ -пучка у середовище.

З цього рівняння визначимо μ :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu d}; \frac{I_0}{I} = e^{\mu d}; \ln \frac{I_0}{I} = \mu d. \text{ Звідки}$$

$$\mu = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{d}.$$

За умовою задачі $\frac{I}{I_0} = K$. Тоді

$$\mu_1 = \frac{\ln K}{l_1}; \mu_2 = \frac{\ln K}{l_2}.$$

Обрахунки:

$$\mu_1 = \frac{\ln 10}{0,58} = \frac{2,30}{0,58} = 3,97 \text{ м}^{-1}; \mu_2 = \frac{\ln 10}{4,9 \cdot 10^{-2}} = \frac{2,30}{4,9 \cdot 10^{-2}} = 46,94 \text{ м}^{-1}$$

Відповідь: лінійний коефіцієнт поглинання γ -квантів свинцем у 11,82 разів більший, ніж водою.

4.17. На ядро атома золота налітає α -частинка, кінетична енергія якої $T=5 \text{ MeV}$. Параметр зіткнення $\rho = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ см}$. На який кут розсіюється частинка?

Дано: $T=5 \text{ MeV}$ $\rho = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ $Z = 79$	СІ $8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ $2,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}$	Аналіз: Кут розсіяння θ визначається співвідношенням $ctg \frac{\theta}{2} = \frac{T}{u},$ де T – кінетична енергія налітаючої частинки, $u = \frac{qZe}{4\pi\epsilon_0\rho}$ – потенціальна енергія частинки в полі ядра золота.
$\theta - ?$		

Тоді
$$ctg \frac{\theta}{2} = \frac{T \cdot 4\pi\epsilon_0\rho}{qZe}.$$

Звідки
$$\theta = 2 \arccctg \frac{T \cdot 4\pi\epsilon_0\rho}{qZe}.$$

За умовою задачі $q = 2e$, а $Z = 79$.

Обрахунки:

$$\theta = 2 \arccctg \frac{8 \cdot 10^{-13} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5 \cdot 10^{-15}}{2 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2} = 179,37^\circ$$

Відповідь: кут розсіювання близький до 180° – після зіткнення α -частинка почала рухатися майже у зворотному напрямку.

4.18. В електронному прискорювачі на зустрічних пучках кінетична енергія електронів у кожному з пучків $T_0 = 1,2 \text{ GeV}$. Якій кінетичній енергії T_1 у системі відліку, зв'язаній з одним із пучків, відповідає ця енергія?

Дано: $T_0 = 1,2 \text{ GeV}$ $T_1 - ?$	Аналіз: Кінетична енергія електрона (релятивістський випадок): $T_0 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$
---	---

Відносна швидкість одного з пучків:

$$v_B = \frac{2v}{1 + \frac{v^2}{c^2}}.$$

Тоді
$$T_1 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_B^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Значення v_B підставляємо в останню формулу:

$$T_1 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4v^2}{\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)^2 \cdot c^2}}} - 1 \right) = m_0 c^2 \left(\frac{1 + \frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1 + 2\frac{v^2}{c^2} + \left(\frac{v^2}{c^2}\right)^2} - 4\frac{v^2}{c^2}} - 1 \right) = m_0 c^2 \left(\frac{1 + \frac{v^2}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - 1 \right) = \frac{2m_0 c^2}{\frac{c^2}{v^2} - 1}.$$

Вираз $\frac{c^2}{v^2}$ знаходимо з рівняння для T_0 :

$$\frac{T_0}{m_0 c^2} + 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad \frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{T_0}{m_0 c^2} + 1\right)^2}; \quad \frac{c^2}{v^2} = \frac{\left(\frac{T_0}{m_0 c^2} + 1\right)^2}{\left(\frac{T_0}{m_0 c^2}\right)^2 + 2\frac{T_0}{m_0 c^2}}.$$

Тоді

$$T_1 = \frac{2m_0 c^2}{\frac{\left(\frac{T_0}{m_0 c^2} + 1\right)^2}{\left(\frac{T_0}{m_0 c^2}\right)^2 + 2\frac{T_0}{m_0 c^2}} - 1} = 2\frac{T_0}{m_0 c^2} + 4T_0$$

Обрахунки:

$$T_1 = \frac{2 \cdot 1,2^2}{0,51 \cdot 10^{-3}} + 4 \cdot 1,2 = 5,64 \cdot 10^3 \text{ GeV}$$

Відповідь: кінетична енергія T_1 становить $5,64 \cdot 10^3 \text{ GeV}$.

4.19. Вказати, які з нижче наведених реакцій є можливими, а які заборонені:

а) $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$; б) $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$; в) $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$.

Аналіз:

Оскільки наведені реакції відбуваються з отриманням лептонів, то вони повинні відповідати законам збереження лептонного заряду. Таких законів три:

1) разом з електроном обов'язково повинно народжуватись електронне антинейтрино, а з позитроном – електронне нейтрино.

Тобто пари e^- і $\bar{\nu}_e$ та e^+ і ν_e є «нерозлучні».

2) для мюонів такими парами є μ^- і $\bar{\nu}_\mu$ та μ^+ і ν_μ .

3) для таонів відповідними парами є τ^- і $\bar{\nu}_\tau$ та τ^+ і ν_τ .

З погляду на це реакція а) заборонена, а реакції б) та в) можливі.

Відповідь: реакція а) суперечить законам збереження лептонного заряду; реакції б) та в) можливі.

4.20. Чим принципово відрізняються нуклони та мезони з погляду кваркової структури? Навести кваркові структури частинок, що належать до нуклонного ізодублета та піонного ізотриплета. Чи можна побудувати каони тільки з кварків першого покоління? Навести кваркову структуру частинок, що належать до каонного ізомультитплета.

Дано:
Кварки
Антикварки
Побудувати
 p, n, π, K .

Аналіз:

Нуклони (протон та нейтрон) складаються з трьох кварків. Кварки підбирають так, щоб у випадку протона їх сумарний заряд був рівний одиниці, а у випадку нейтрона нулю. Сумарний спін як протона, так і нейтрона повинен бути $\frac{1}{2}$. Нуклони не мають кольору. Тому набір кольорових кварків повинен бути таким, щоб у сумі одержати кольоровий нуль. Цим умовам відповідають такі набори кварків: для протона $p(uud)$, для нейтрона $n(udd)$. Протон і нейтрон складають нуклонний ізодуплет.

При утворенні піонів виходять із слідуочого: піони мають нульовий спін, тому вони повинні складатись із двох кварків, спіни яких протилежні. Піони також не мають кольору. Заряд π^+ рівний одиниці, заряд π^- дорівнює мінус одиниці, у π^0 заряд відсутній. Щоб забезпечити ці вимоги, набір кварків повинен бути таким: $\pi^+(u\bar{d})$, $\pi^-(\bar{u}d)$ або $\pi^0(u\bar{u})$ або $\pi^0(d\bar{d})$. Три піона складають піонний ізотриплет.

До кварків першого покоління відносяться $u(\bar{u})$ та $d(\bar{d})$. Ці кварки мають нульову дивність. Каони ж мають дивність $-1(+1)$. Тому із кварків $u(\bar{u})$ та $d(\bar{d})$ побудувати каони не можна. У кварка другого покоління $s(\bar{s})$ дивність є, за допомогою цього кварка каони можна будувати. Каонний ізомультиплет має вигляд: $K^+(u\bar{s})$, $K^-(\bar{u}s)$, $K^0(d\bar{s})$, $\bar{K}_0^0(\bar{d}s)$.

Відповідь: 1) нуклони складаються з трьох кварків, мезони – з двох;

2) побудувати каони лише з кварків першого покоління неможливо.

5. Розподіл завдань за варіантами

Варіанти	Номери задач						
I							
1	1	41	81	121	161	201	241
2	2	42	82	122	162	202	242
3	3	43	83	123	163	203	243
4	4	44	84	124	164	204	244
5	5	45	85	125	165	205	245
6	6	46	86	126	166	206	246
7	7	47	87	127	167	207	247
8	8	48	88	128	168	208	248
9	9	49	89	129	169	209	249
10	10	50	90	130	170	210	250
11	11	51	91	131	171	211	251
12	12	52	92	132	172	212	252
13	13	53	93	133	173	213	253
14	14	54	94	134	174	214	254
15	15	55	95	135	175	215	255
16	16	56	96	136	176	216	256
17	17	57	97	137	177	217	257
18	18	58	98	138	178	218	258
19	19	59	99	139	179	219	259
20	20	60	100	140	180	220	260

Варіанти	Номери задач						
II							
21	21	61	101	141	181	221	261
22	22	62	102	142	182	222	262
23	23	63	103	143	183	223	263
24	24	64	104	144	184	224	264
25	25	65	105	145	185	225	265
26	26	66	106	146	186	226	266
27	27	67	107	147	187	227	267
28	28	68	108	148	188	228	268
29	29	69	109	149	189	229	269
30	30	70	110	150	190	230	270
31	31	71	111	151	191	231	271
32	32	72	112	152	192	232	272
33	33	73	113	153	193	233	273
34	34	74	114	154	194	234	274
35	35	75	115	155	195	235	275
36	36	76	116	156	196	236	276
37	37	77	117	157	197	237	277
38	38	78	118	158	198	238	278
39	39	79	119	159	199	239	279
40	40	80	120	160	200	240	280

6. Завдання для контрольної роботи

1. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_1D^2$.
2. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_1T^3$.
3. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_2He^3$.
4. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_2He^4$.
5. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_3Li^6$.
6. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_3Li^7$.
7. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_4Be^7$.
8. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_5B^{11}$.
9. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_6C^{12}$.
10. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_6C^{13}$.
11. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_6C^{14}$.
12. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_7N^{13}$.
13. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_7N^{14}$.
14. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_7N^{15}$.
15. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_8O^{15}$.
16. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_8O^{16}$.
17. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_8O^{17}$.
18. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_9F^{18}$.
19. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_9F^{19}$.
20. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_9F^{20}$.
21. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{10}Ne^{19}$.
22. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{10}Ne^{20}$.
23. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{10}Ne^{21}$.
24. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{11}Na^{23}$.
25. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{11}Na^{24}$.
26. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{13}Al^{27}$.
27. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{13}Al^{28}$.
28. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{14}Si^{28}$.
29. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{14}Si^{30}$.
30. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{15}P^{31}$.
31. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{27}Co^{58}$.
32. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{38}Sr^{90}$.
33. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{84}Po^{210}$.
34. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{86}Rn^{222}$.
35. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{88}Ra^{226}$.
36. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{90}Th^{232}$.
37. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{92}U^{235}$.

38. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$.
39. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{92}\text{U}^{239}$.
40. Визначити склад та питому енергію зв'язку ядра ${}_{94}\text{Pu}^{239}$.
41. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{94}\text{Pu}^{239}$.
42. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{92}\text{U}^{239}$.
43. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$.
44. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$.
45. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{90}\text{Th}^{232}$.
46. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{88}\text{Ra}^{226}$.
47. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{86}\text{Rn}^{222}$.
48. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{84}\text{Po}^{210}$.
49. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{38}\text{Sr}^{90}$.
50. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{27}\text{Co}^{58}$.
51. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{15}\text{P}^{31}$.
52. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{14}\text{Si}^{30}$.
53. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{14}\text{Si}^{28}$.
54. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{13}\text{Al}^{28}$.
55. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{13}\text{Al}^{27}$.
56. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{11}\text{Na}^{24}$.
57. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_{11}\text{Na}^{23}$.

58. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{10}\text{Ne}^{21}$.
59. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{10}\text{Ne}^{20}$.
60. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{10}\text{Ne}^{19}$.
61. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{9}\text{F}^{20}$.
62. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{9}\text{F}^{19}$.
63. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{9}\text{F}^{18}$.
64. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{8}\text{O}^{17}$.
65. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{8}\text{O}^{16}$.
66. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{8}\text{O}^{15}$.
67. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{7}\text{N}^{15}$.
68. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{7}\text{N}^{14}$.
69. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{7}\text{N}^{13}$.
70. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{6}\text{C}^{14}$.
71. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{6}\text{C}^{13}$.
72. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{6}\text{C}^{12}$.
73. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{5}\text{B}^{11}$.
74. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{4}\text{Be}^7$.
75. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра $_{3}\text{Li}^7$.

76. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_3\text{Li}^6$.
77. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_2\text{He}^4$.
78. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_2\text{He}^3$.
79. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_1\text{T}^3$.
80. Оцінити розміри та визначити за формулою Вейцеккера питому енергію зв'язку ядра ${}_1\text{D}^2$.
81. За 276 діб розпалося 10^{20} атомів полонію ${}_{84}\text{Po}^{210}$. Яка була початкова маса полонію? Побудувати графік N від t .
82. Визначити сталу λ радіоактивного розпаду Co^{55} , якщо за годину розпадається 4% початкової кількості ядер? Побудувати графік залежності N від t .
83. В урановій руді відношення кількості ядер ${}_{92}\text{U}^{238}$ до кількості ядер ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ становить $k = 2,8$. Оцінити вік t руди, вважаючи, що весь свинець є кінцевим продуктом розпаду уранової руди.
84. Зразок радіоактивного радону ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ містить 10^{10} радіоактивних атомів з періодом піврозпаду 3,825 діб. Скільки атомів розпадеться за добу? Побудувати графік $(N_0 - N)$ від t .
85. Визначити постійну радіоактивного розпаду радію ${}_{88}\text{Ra}^{226}$. Яка частина від первинного числа атомів розпадається за 3100 років? Побудувати графік залежності N від часу.
86. За який час у препараті полонію ${}_{84}\text{Po}^{210}$ розпадається 75% атомів, якщо безперервно видаляти радіоактивні продукти розпаду?
87. За який час відбудеться розпад 2 мг полонію ${}_{84}\text{Po}^{210}$, якщо в початковий момент його маса 0,2 г?
88. Скільки атомів у зразку урану ${}_{92}\text{U}^{238}$ масою 1 г розпадається за 1 с?
89. Скільки ядер розпадеться за 1 с в частині урану ${}_{92}\text{U}^{238}$ масою 1 кг? Яка активність цього урану?
90. Яка частка радіоактивних ядер деякого елемента розпадеться за час, що дорівнює половині періоду піврозпаду?
91. Скільки відсотків радіоактивних ядер кобальту залишаться через місяць, якщо період піврозпаду 71 день?
92. Активність радіоактивного елемента зменшилась у 4 рази за 8 днів. Визначити період піврозпаду.
93. Знайти число розпадів за 1 с в 2 мг препарату Sr^{90} .
94. Знайти число розпадів за 1 год в 1 г ізотопу U^{238} .

95. За який час розпадеться 7% радіоактивного препарату J^{124} ?
96. Яка частина початкової кількості радіоактивного препарату Co^{60} залишиться через 1 рік?
97. Визначити, яка частина початкової маси радіоактивного препарату ${}_{90}Th^{231}$ залишиться через 15 днів, якщо період піврозпаду його 24,5 дня.
98. Радіоактивний ${}_{86}Rn^{222}$ має період піврозпаду 3,825 діб. Скільки препарату залишиться через 5 днів, якщо на початку спостереження його було 10^{-2} г ?
99. 18,7 г урану-235 зберігали упродовж року. Яка кількість ядер розпалась за цей час?
100. Радіоактивний фосфор ${}_{15}P^{32}$ зберігають упродовж 10 днів. Скільки атомів препарату залишиться, якщо на початку його було 1 г?
101. Радіоактивний препарат ${}_{53}J^{131}$ з періодом піврозпаду 8 днів зберігали упродовж 6 днів. Яка кількість радіоактивного ізотопу залишиться після цього, якщо на початку зберігання його було 10 г?
102. Зразок містить 10^3 радіоактивних атомів з періодом піврозпаду T . Скільки атомів залишиться через проміжок часу $\frac{T}{2}$? Побудувати графік залежності N від t .
103. Через який час розпадеться 75% наявних атомів полонію ${}_{84}Po^{210}$, якщо безперервно видаляти радіоактивні продукти розпаду? Побудувати графік залежності N від t .
104. Визначити період піврозпаду вісмуту ${}_{83}Bi^{210}$, якщо відомо, що вісмут масою 1,0 г викидає $4,58 \cdot 10^{15}$ β -частинок за 1с.
105. Скільки ядер розпадається за 1с у препараті радіоактивного ізотопу іридію ${}_{77}Ir^{192}$ і скільки залишиться атомів цього препарату через 30 діб, якщо початкова його маса рівна 5 г?
106. Скільки α -частинок викидає ${}_{90}Th^{232}$ масою 1г за 1с? Побудувати часовий графік цього процесу.
107. Чому дорівнює активність радону, що утворюється з 1г радію за 1 год? Графічно зобразити зміну активності з часом.
108. Протягом 1 год. у препараті ${}_{38}Sr^{90}$ масою 1мг розпадається $3,03 \cdot 10^{13}$ ядер. Знайти період піврозпаду стронцію.
109. Радіоактивний натрій ${}_{11}Na^{24}$ розпадається, викидаючи β -частинку. Період піврозпаду 14,8 год. Знайти кількість атомів, що розпадаються за 10^{-2} с в 1мг препарату. Побудувати графічно цю залежність від часу.
110. Радіоактивний свинець ${}_{82}Pb^{214}$ має період піврозпаду 26,8 хв. У результаті β -розпаду він перетворюється у ${}_{83}Bi^{210}$. Скільки вісмуту можна одержати через 5 хв., якщо маса свинцю становить 1кг?

111. Яка частка початкової кількості ядер ${}_{38}\text{Sr}^{90}$ розпадеться за одну добу? Яка частка залишиться через 10 років? Побудувати залежність N від t .
112. Період піврозпаду ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ становить 3,825 діб. За добу розпалося 10^{20} радіоактивних атомів. Яка була початкова маса радону? Побудувати графік зміни N з часом.
113. Яка частка атомів іридію ${}_{77}\text{Ir}^{192}$ залишиться через 150 діб? Побудувати часовий графік цього процесу.
114. Яка частка стронцію ${}_{38}\text{Sr}^{90}$ розпадеться за 1 добу? Побудувати часовий графік цього процесу.
115. Зразок містить 10^{20} радіоактивних атомів з періодом піврозпаду T . Скільки атомів розпадеться за проміжок часу $2T$? Побудувати графік залежності $(N_0 - N)$ від часу.
116. Визначити питому активність урану ${}_{92}\text{U}^{235}$. Побудувати графік зміни активності з часом.
117. Визначити питому активність радону ${}_{86}\text{Rn}^{222}$. Побудувати графік зміни активності з часом.
118. Знайти масу радону, активність якого становить 1 кюрі. Побудувати графік зміни активності цього препарату з часом.
119. Знайти кількість полонію ${}_{84}\text{Po}^{210}$, активність якого рівна $3,7 \cdot 10^{10}$ розп/с. Побудувати графік зміни активності цього препарату з часом.
120. Деякий радіоактивний препарат має постійну розпаду $\lambda = 1,44 \cdot 10^{-3}$ год $^{-1}$. Через який час розпадеться 75% початкової кількості атомів? Побудувати графік залежності числа ядер, що розпалися, від часу.
121. Визначити, чи може реакція $\text{Mn}^{55}(n, \alpha)\text{V}^{52}$ відбуватися в природних умовах.
122. Визначити, чи можливе протікання реакції $\text{Ti}^{50}(n, \gamma)\text{T}^{51}$ у природних умовах.
123. Визначити, чи можливе протікання реакції $\text{U}^{238}(n, \gamma)\text{U}^{239}$ у природних умовах.
124. Визначити, чи можливе протікання реакції $\text{N}^{14}(\alpha, p)\text{O}^{17}$ у природних умовах.
125. Визначити, чи можливе протікання реакції $\text{Al}^{27}(n, \alpha)\text{X}$ у природних умовах.
126. Визначити, чи можливе протікання реакції $\text{F}^{19}(p, x)\text{O}^{16}$ у природних умовах.
127. Визначити, чи можливе протікання реакції $\text{Mn}^{55}(x, n)\text{Fe}^{55}$ у природних умовах.

128. Визначити, чи можливе протікання реакції $N^{14}(n, \alpha)C^{16}$ у природних умовах.
129. Визначити, чи можливе протікання реакції $X(p, \alpha)N^{22}$ у природних умовах.
130. Визначити, чи можливе протікання реакції $Al^{27}(\gamma, x)Mg^{26}$ у природних умовах.
131. Визначити, чи можливе протікання реакції $Al^{27}(\gamma, n)X$ у природних умовах.
132. Визначити, чи можливе протікання реакції $X(\gamma, n)W^{181}$ у природних умовах.
133. Визначити, чи може реакція $Li^7(p, \alpha)X$ відбуватися в природних умовах.
134. Визначити, чи може реакція $Si^{28}(n, p)X$ відбуватися в природних умовах.
135. Визначити, чи може реакція $B^{10}(x, \alpha)Li^7$ відбуватися в природних умовах.
136. Визначити, чи може реакція $F^{19}(n, p)X$ відбуватися в природних умовах.
137. Визначити, чи може реакція $X(n, \gamma)F^{20}$ відбуватися в природних умовах.
138. Визначити, чи може реакція $Al^{27}(\alpha, x)P^{30}$ відбуватися в природних умовах.
139. Визначити, чи може реакція $Li^7(x, \gamma)Be^8$ відбуватися в природних умовах.
140. Визначити, чи може реакція $F^{19}(x, p)F^{20}$ відбуватися в природних умовах.
141. Визначити, чи може реакція $Fe^{56}(D, x)Mn^{54}$ відбуватися в природних умовах.
142. Визначити, чи може реакція $Fe^{54}(n, x)M^{54}$ відбуватися в природних умовах.
143. Визначити, чи може реакція $Fe^{58}(n, x)M^{56}$ відбуватися в природних умовах.
144. Визначити, чи може реакція $Cu^{63}(p, n)X$ відбуватися в природних умовах.
145. Визначити, чи може реакція $B^{11}(\alpha, n)X$ відбуватися в природних умовах.

146. Визначити, чи може реакція $X(\alpha, n)Md^{256}$ відбуватися в природних умовах.
147. Визначити, чи може реакція $C^{12}(p, x)C^{13}$ відбуватися в природних умовах.
148. Визначити, чи може реакція $D^2(\gamma, n)P$ відбуватися в природних умовах.
149. Визначити, чи може реакція $U^{238}(D^2, 2n)X$ відбуватися в природних умовах.
150. Визначити, чи може реакція $Pb^{207} + Cr^{54} \rightarrow 106^{259} + 2n$ відбуватися в природних умовах.
151. Визначити, чи може реакція $Bi^{209} + Cr^{54} \rightarrow 107^{261} + 2n$ відбуватися в природних умовах.
152. Визначити у MeV енергетичний вихід термоядерної реакції $D + T \rightarrow He^2 + n$.
153. Визначити у MeV енергетичний вихід термоядерної реакції $T + T \rightarrow He^4 + 2n$.
154. Визначити у MeV енергетичний вихід термоядерної реакції $D + D \rightarrow T + p$.
155. Визначити у MeV енергетичний вихід термоядерної реакції $D(p, \gamma)X$.
156. Визначити у MeV енергетичний вихід термоядерної реакції $He^3(D, p)X$.
157. Визначити у MeV енергетичний вихід термоядерної реакції $X(T, 2p)He^4$.
158. Визначити у MeV енергетичний вихід термоядерної реакції $He^3(He^3, x)He^4$.
159. Визначити у MeV енергетичний вихід термоядерної реакції $He^4(D, \gamma)X$.
160. Визначити у MeV енергетичний вихід термоядерної реакції $He^4(x, \gamma)Li^7$.
161. Чим пояснюється той факт, що гіромагнітне відношення для протона не дорівнює такому самому відношенню для електрона? Чим пояснити, що гіромагнітне відношення для нейтрона не дорівнює нулеві?
162. Оцінити для протонів у ядрі сили електростатичного відштовхування, гравітаційного притягання та магнітної взаємодії.
163. Користуючись формулою Вейцзеккера, порівняти поверхневу енергію ядер O^{16} та Fe^{56} .
164. Користуючись формулою Вейцзеккера, порівняти енергію кулонівського відштовхування ядер Te^{128} та U^{235} .
165. Відомо, що ядерні сили мають обмінний характер, тобто нуклони взаємодіють між собою внаслідок обміну піонами. Виходячи з того, що

- ці сили мають скінченний радіус дії $r_{\text{я}} \sim 10^{-15} \div 10^{-14}$ м, оцінити власну масу $m_{\text{п}}$ піона та встановити її зв'язок з комптонівською довжиною хвилі частинки.
166. Для ядра O^{18} енергія зв'язку $E_1 = 139,8$ MeB, а для ядра F^{19} $E_2 = 147,8$ MeB. Яку мінімальну енергію треба витратити, щоб відірвати один протон від ядра фтору?
 167. Яку мінімальну енергію слід витратити для того, щоб відокремити один від одного нуклони в ядрах Li^7 та Be^7 . Чому ця енергія для ядра берилію менша за енергію для ядра літію?
 168. Обчислити поріг та енергію реакції $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$, якщо вона відбувається внаслідок зіткнення γ -кванта з протоном.
 169. Обчислити поріг та енергію реакції $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$, якщо вона відбувається внаслідок зіткнення γ -кванта з ядром C^{12} .
 170. Визначити порогову енергію, яка потрібна для народження пари нуклон-антинуклон у разі зіткнення двох протонів, та порівняти її з енергією реакції.
 171. У реакції $Ra^{226} \rightarrow He^4 + Rn^{222}$ кінетична енергія α -частинки, що вилетіла з ядра, $T = 4,7$ MeB. Визначити повну енергію, що виділяється при її вильоті, та кінетичну енергію ядра віддачі $T_{\text{від}}$.
 172. З якої найменшої маси руди $m_{\text{р}}$, що містить $\eta = 18\%$ нукліда U^{238} , можна одержати $m_{\text{Ra}} = 1$ г радію? Прийняти, що час піврозпаду ядер, які є продуктами перетворень нукліда U^{238} , значно менший за час піврозпаду вихідних ядер.
 173. Енергія першого збудженого рівня ядра атома заліза Fe^{57} $E = 14$ кеВ, час його життя $\tau = 10^{-7}$ с. Чи можливе резонансне поглинання цим ядром γ -квантів з такою енергією?
 174. Флуоресціюючий екран площею $0,03$ см² знаходиться на відстані 1 см від порошинки радію ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ масою 18 нг. Скільки спалахів за 1 хв. одержиться на екрані.
 175. Порошинка, що містить радій ${}_{88}\text{Ra}^{226}$, знаходиться на відстані $1,2$ см від флуоресціюючого екрану. Яку масу має порошинка, якщо протягом 1 хв. на поверхні екрану $0,602$ см² було зареєстровано 47 сцинуляцій?
 176. Родовищам радіоактивних елементів завжди супроводжує свинець, який є кінцевим продуктом їх розпаду. Відомо, торієвий ряд закінчується ізотопом свинцю ${}_{82}\text{Pb}^{208}$. Вважаючи вік торієвої руди $4 \cdot 10^9$ років, визначити скільки свинцю з'явилось у цій руді на 1 кг торію ${}_{90}\text{Th}^{232}$.

177. Радій масою 1 г випромінює за 1 с $3,7 \cdot 10^{10}$ α -частинок, які мають швидкість $v = 15 \text{ Мм/с}$. Визначити повну енергію, що випромінюється при α -розпаді за 1 год.
178. При опроміненні нейтронами атомів ${}_{11}\text{Na}^{23}$ одержують радіоактивний ізотоп ${}_{11}\text{Na}^{24}$ з періодом піврозпаду 15,3 год. Яка частка початкової маси радіоактивного натрію залишиться через 30,6 год. після закінчення опромінення нейтронами?
179. Ядро урану ${}_{92}\text{U}^{238}$, випромінюючи α -частинку з енергією 4,2 MeB, перетворюється в ядро торію ${}_{90}\text{Th}^{234}$. Визначити масу атома ${}_{90}\text{Th}^{234}$, якщо маса атома ${}_{92}\text{U}^{238}$ рівна 238,05353 а.о.м.
180. Свинець ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ є кінцевим продуктом уранового ряду. Визначити вік уранової руди, якщо відомо, що на 1 кг урану ${}_{92}\text{U}^{238}$ у цій руді припадає 320 г свинцю ${}_{82}\text{Pb}^{206}$.
181. Обчислити поріг ядерної реакції ${}_{7}\text{N}^{14}(\alpha, p)$.
182. Обчислити поріг ядерної реакції ${}_{3}\text{Li}^7(p, n)$.
183. Деяка кількість радону N' , для якого $\lambda = 0,181 \text{ діб}^{-1}$, знаходиться у порожній посудині. Побудувати криву залежності зміни кількості радону $\frac{N}{N'}$ у посудині від часу в інтервалі від 0 до 20 діб через кожні дві доби. Із цієї кривої визначити період піврозпаду.
184. Деяка кількість радію знаходиться у закритій посудині. Через який час кількість атомів радону N у цій посудині буде відрізняться на 10% від тієї кількості атомів радону N' , яка відповідає радіоактивній рівновазі радію з радоном у цій посудині? Побудувати криву залежності $\frac{N}{N'}$ від часу у проміжку від 0 до $6T$. На вісі абсцис за одиницю часу взяти період піврозпаду радону T .
185. Кінетична енергія α -частинки, що вилітає із ядра атома радія при радіоактивному розпаді, рівна 4,78 MeB. Визначити швидкість α -частинки та повну енергію, що виділяється при вильоті α -частинки.
186. У результаті розпаду 1 г радію за рік утворюється деяка кількість гелію, який займає при нормальних умовах об'єм 0,043 см³. На основі цих даних визначити число Авогадро.
187. В ампулі знаходиться препарат, що містить 1,5 г радію. Яка кількість радону накопичиться у цій закритій ампулі через час $t = \frac{T}{2}$, де T – період піврозпаду радону?
188. За допомогою іонізаційного лічильника досліджується швидкість розпаду деякого радіоактивного препарату. У початковий момент

- лічильник реєструє 75 сигналів за 10 с. Яку кількість сигналів зареєструє лічильник за 10 с через час $\frac{T}{2}$? Вважати, що $T \gg 10$ с.
189. α -частинка з препарату радію, вилітає зі швидкістю $1,5 \cdot 10^4$ км/с і ударяється об флуоресціюючий екран. Вважаючи, що екран споживає 0,25 Вт на 1 кд, визначити силу світла екрану, якщо на нього потрапляють всі α -частинки, які випромінює 1 мкг радію.
 190. До 10 мг радіоактивного ізотопу ${}_{20}\text{Ca}^{45}$ додано 30 мг нерадіоактивного ізотопу ${}_{20}\text{Ca}^{45}$. На скільки зменшилась питома активність препарату?
 191. Кінетична енергія α -частинки, що вилітає із ядра атома полонію ${}_{84}\text{Po}^{214}$ при радіоактивному розпаді, становить 7,68 MeV. Визначити швидкість α -частинки та повну енергію, яка виділяється при вильоті α -частинки.
 192. Знаючи період піврозпаду T радіоактивного ізотопу, визначити час його життя τ . Знайти τ для нейтрона.
 193. Знаючи період піврозпаду T радіоактивного ізотопу, визначити сталу його розпаду λ . Знайти λ для тритію.
 194. Побудувати графік залежності довжини пробігу протона R у повітрі за нормальних умов від його кінетичної енергії T в інтервалі від 1 до 10 MeV.
 195. Побудувати графік залежності кінетичної енергії T протона у повітрі за нормальних умов в інтервалі від 1 до 10 MeV від довжини його пробігу R .
 196. Побудувати графік залежності кінетичної енергії T α -частинки у повітрі за нормальних умов в інтервалі енергії від 1 до 10 MeV від довжини її пробігу R .
 197. Побудувати графік залежності довжини пробігу α -частинки R у повітрі за нормальних умов від її кінетичної енергії T в інтервалі від 1 до 10 MeV.
 198. У повітрі за нормальних умов рухається α -частинка, енергія якої $T = 7$ MeV. Чому дорівнює довжина її пробігу $R_{\text{п}}$ за цих умов та пробігу $R_{\text{ал}}$ в алюмінії?
 199. Протон та іон дейтерію мають енергії $T = 2$ MeV. Визначити довжини їх пробігів у фотоемальсії, густина якої $\rho = 3,84$ г/см³ і молярна маса $M = 2,9 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.
 200. Протон та α -частинка мають енергію $T = 2$ MeV. Визначити довжини їх пробігу в алюмінії.

201. Які ядерні реакції використовуються для одержання ядерної енергії у промислових масштабах? Чи використовується тут енергія, яка виділяється під час радіоактивних перетворень атомних ядер.
202. Пояснити фізичний зміст поняття «Енергія активації атомного ядра». Чи має вона відношення до порога реакції?
203. З дослідів відомо, що ядра U^{235} можуть ділитися як під впливом швидких, так і теплових нейтронів, ядра ж U^{238} діляться тільки швидкими ($\sim 1 \text{ MeV}$) нейтронами. Пояснити цю відмінність, маючи на увазі, що енергія активації ядер U^{236} та U^{239} відповідно $E_{\text{акт1}} = 5,3 \text{ MeV}$ та $E_{\text{акт2}} = 6,1 \text{ MeV}$.
204. Визначити частку енергії η , яку втрачає нейтрон під час пружного розсіяння на кут $\theta = 180^\circ$ на ядрах дейтерію.
205. Визначити частку енергії η , яку втрачає нейтрон під час пружного розсіяння на кут 180° на ядрах тритію.
206. Визначити частку енергії, яку втрачає нейтрон під час пружного розсіяння на кут 180° на ядрах гелію.
207. Визначити частку енергії, яку втрачає нейтрон під час пружного розсіяння на кут 180° на ядрах вуглецю.
208. Середній час життя одного покоління повільних нейтронів у ядерному реакторі $T = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. За який час t кількість нейтронів у реакторі збільшиться $\eta = 100$ разів, якщо коефіцієнт розмноження нейтронів $k = 1,01$? Який висновок можна зробити у цьому разі щодо робочого стану реактора?
209. Підводний човен має потужність атомних двигунів $P = 14,7 \text{ МВт}$, паливом для яких є уран, збагачений нуклідом U^{235} . Визначити мінімальні витрати m пального під час плавання човна протягом одного місяця. Вважати, що при поділі одного ядра U^{235} виділяється 200 MeV енергії.
210. Яка електрична потужність P атомної електростанції з ККД $\eta = 25\%$, що споживає цілодобово $m = 220 \text{ т}$ урану U^{235} ? Вважати, що при поділі одного ядра U^{235} виділяється 220 MeV енергії.
211. Яке добове споживання ядерного пального в реакторі типу ВВЕР-1000 атомної електростанції ($P = 1 \text{ ГВт}$) при ККД електростанції $\eta = 40\%$. Вважати, що при поділі одного ядра U^{235} виділяється 200 MeV енергії.

212. Ядро U^{235} у разі поділу виділяє 200 MeV енергії. Атомна бомба містить $m = 1,5 \text{ кг}$ урану. Чому дорівнює еквівалентна маса тротилу m_t , якщо його теплотворна здатність $q = 4,1 \text{ МДж/кг}$?
213. Скільки кВт-годин можна одержати від поділу 1 г урану U^{235} , якщо при поділі одного ядра U^{235} виділяється 200 MeV енергії?
214. Яка кількість урану U^{235} витрачається за добу на атомній електростанції потужністю 5000 кВт ? ККД $\eta = 17\%$. Вважати, що при поділі одного ядра U^{235} виділяється 200 MeV енергії.
215. Під час вибуху водневої бомби відбувається термоядерна реакція утворення гелію з дейтерію і тритію. Яку кількість енергії можна одержати при утворенні 1 г гелію?
216. У деяких зірках відбувається процес $3He^4 \rightarrow C^{12}$. Яка кількість теплоти Q виділяється при утворенні одного моля вуглецю?
217. Яку масу m бору треба взяти для того, щоб за допомогою реакції $B^{11} + H^1 \rightarrow 3He^4$ одержати 1 моль гелію? Яка при цьому енергія виділиться?
218. Обчислити енергію E , що виділяється при вигоранні $m = 1 \text{ г}$ дейтерієвої плазми під час реакції $H^2 + H^2 \rightarrow H^3 + p$.
219. Визначити енергію, що вивільняється при утворенні з протонів та нейтронів 1 г гелію.
220. При поділі U^{235} одержали 82 ГДж енергії. Яка маса урану розщепилася, якщо при поділі одного ядра U^{235} вивільняється 200 MeV енергії?
221. Скільки вугілля калорійністю $29,3 \text{ МДж/кг}$ необхідно спалити, щоб одержати таку ж енергію, як при розщепленні 1 кг U^{235} ? Вважати, що при поділі одного ядра урану вивільняється 200 MeV енергії.
222. Вважається, що на Сонці відбувається ланцюг термоядерного синтезу, кінцевим результатом якого є перетворення 4 атомів водню в 1 атом гелію. Скільки води можна нагріти від 0°C до 100°C за рахунок перетворення в гелій 1 г водню?
223. Потужність ядерного реактора, що працює на поділі U^{235} , становить $28,5 \text{ МВт}$. Скільки ядерного пального витрачає АЕС за добу? Прийняти, що при поділі одного ядра урану вивільняється 200 MeV енергії?
224. Потужність уранового реактора 1 МВт . Скільки урану U^{235} споживає він за 1 годину, якщо при поділі кожного ядра урану вивільняється 200 MeV енергії?
225. Визначити електричну потужність АЕС, яка витрачає уран U^{235} масою $0,1 \text{ кг}$ за добу при ККД станції 16% .

226. Реактор потужністю 100 MWt виробляє плутоній Pu^{239} . Виходячи з того, що у середньому при одному акті поділу ядра U^{235} виникає 1,5 ядра Pu^{239} , визначити скільки плутонію утвориться за 10 діб.
227. Електрон пройшов різницю потенціалів і набув кінетичну енергію $0,76 \text{ MeV}$. Визначити швидкість електрона.
228. Визначити швидкість електрона, якщо його повна енергія $E = 1,02 \text{ MeV}$.
229. Електрон, який володіє кінетичною енергією $E_k = 300 \text{ MeV}$, влітає в камеру Вільсона і залишає трек у вигляді дуги кола. Камера знаходиться в однорідному магнітному полі індукцією $B = 10 \text{ Тл}$. Визначити радіус кола.
230. Радіус кривизни траєкторії електрона і позитрона, утворених в камері Вільсона фотоном енергією $6,0 \text{ MeV}$, дорівнює $3,5 \text{ см}$. Яка індукція магнітного поля, в якому знаходиться камера Вільсона?
231. Синхрофазотрон надає протонам кінетичну енергію 10 GeV . У скільки разів релятивіська маса протона більша його маси спокою?
232. У магнітному полі циклотрона під дією різниці потенціалів між дуантами відбувається рух протонів. Скільки обертів вони повинні зробити, щоб їх маса виросла на 5% у порівнянні з масою нерухомих протонів. Між дуантами протони рухаються завжди при максимальній різниці потенціалів, рівній 30 кВ .
233. Потік заряджених частинок влітає в однорідне магнітне поле, індукція якого 3 Тл . Швидкість частинок перпендикулярна до силових ліній поля і становить $1,52 \cdot 10^7 \text{ м/с}$. Визначити заряд кожної частинки, якщо сила, що діє на неї, рівна $1,46 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$.
234. Заряджена частинка влітає в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 0,5 \text{ Тл}$ і рухається по колу радіусом 10 см . Швидкість частинки $2,4 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. Визначити для цієї частинки відношення її заряду до маси.
235. Нейтрон, що має початкову енергію $4,6 \text{ MeV}$, у результаті зіткнень з протонами сповільнюється. Вважаючи, що при кожному зіткненні енергія нейтрона зменшується удвічі, визначити скільки зіткнень повинно відбутися, щоб енергія нейтрона зменшилася до $0,23 \text{ eV}$.
236. Одержати формулу, яка б зв'язувала індукцію магнітного поля циклотрона і частоту прикладеної до дуантів різниці потенціалів. Визначити також частоту прикладеної до дуантів різниці потенціалів для дейтонів. Індукція магнітного поля рівна 3 Тл .
237. Одержати формулу, яка б зв'язувала енергію вилітаючих із циклотрона частинок і максимальний радіус кривизни траєкторії частинок.

- Визначити також енергію вилітаючих із циклотрона протонів, якщо частота прикладеної до дуантів різниці потенціалів становить 12 МГц .
238. У циклотроні з максимальним радіусом кривизни траєкторії $R = 0,35 \text{ м}$ частота прикладеної до дуантів різниці потенціалів $\nu = 1,38 \cdot 10^7 \text{ Гц}$. Для роботи з протонами визначити індукцію магнітного поля, необхідну для синхронізації роботи циклотрона, та максимальну енергію вилітаючих протонів.
239. З якою швидкістю змінюється магнітний Φ у прискорювальній камері бетатрона, якщо за один оберт електрон набуває в ній енергії $T = 75 \text{ eВ}$?
240. Чи придатний циклотрон для прискорення: а) електронів, енергія яких $T = 0,5 \text{ MeВ}$; б) протонів з такою ж енергією; в) протонів, енергія яких $T = 1 \text{ GeВ}$?
241. Яку роль відіграють калібрувальні бозони у формуванні окремих видів фундаментальних взаємодій? Чи існує зв'язок між масою калібрувального бозона, що відповідає за перенесення певної взаємодії, та радіусом цієї взаємодії? Якщо існує, то який? У чому полягає схожість і в чому – принципова різниця між фотонами та глюонами?
242. Чи відбувається розпад $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$? Відповідь обґрунтуйте.
243. Чи є серед частинок n , π^0 , K^0 , Λ , γ , Σ^0 , η дійсно нейтральні?
244. Вказати, які з процесів є можливими: а) $H^2 + H^2 \rightarrow \pi^0 + H^2 + H^2$;
 б) $H^2 + H^2 \rightarrow \pi^0 + He^4$; в) $p + p \rightarrow \pi^0 + n + p$;
 г) $n + n \rightarrow \pi^- + p + n$; д) $n + p \rightarrow \pi^0 + p + n$.
245. Чи можуть мати місце наступні розпади: а) $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$;
 б) $\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm + \gamma$; в) $\tau^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$; г) $H^2 \rightarrow \pi^+ + \gamma$?
246. Розпад позитивного каона може відбуватися за такими реакціями: $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+$; $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$; $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$. Чи зберігається просторова парність під час таких процесів?
247. Чи є бозе-частинки серед лептонів та баріонів? Чи є фермі-частинки та бозе-частинки серед адронів?
248. Який висновок можна зробити щодо тотожності електронного нейтрино та його античастинки, якщо реакція $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ спостерігається на досліді, а реакція $\bar{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$ – ні?
249. Порівнюючи склад лептонних поколінь з кварками, вказати кількість кваркових ароматів. Як змінюються маси кварків у межах поколінь, а також під час переходу від одного покоління до вищого? Те саме запитання відносно лептонів.

250. Вільні кварки у природі не знайдені. Щоб пояснити цей факт, було запропоновано гіпотезу, згідно з якою сили, що діють між кварками, зростають зі збільшенням віддалі між ними і тому перешкоджають утворенню вільних кварків та вильоту їх з адронів. Навести модель таких сил.
251. Чому для дослідження внутрішньої структури частинок спостерігають зіткнення їх при високих енергіях?
252. Визначити енергії реакцій $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ та $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$, зробити висновок щодо можливості спонтанного проходження кожної з них.
253. Записати рівняння реакцій β -розпаду нейтрона і протона з урахуванням кваркової структури частинок. Що можна сказати при цьому щодо різниці мас кварків першого покоління?
254. Чи можуть мати місце наступні розпади: а) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$; б) $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$?
255. При співударянні високоенергетичного позитивного мюона і електрона утворюється два нейтрино. Запишіть цю реакцію та поясніть які і чому утворюються нейтрино.
256. При захопленні протоном негативного мюона утворюється нейтрон і ще одна частинка. Запишіть і поясніть цю реакцію.
257. Енергія релятивіських мюонів у космічних променях становить 3 GeV . Визначити відстань, яку пролетять мюони за час їх життя, якщо власний час життя мюона $t_0 = 2,2 \text{ мкс}$, а енергія спокою $E_0 = 100 \text{ MeV}$.
258. Негативно заряджений мюон пролетів у нерухомій системі відліку від місця свого народження до розпаду $l = 4 \text{ км}$. Визначити власний час життя μ^- , якщо швидкість його руху $v = 0,99 c$.
259. Середній час життя K^+ -мезонів $\langle \tau \rangle = 12,3 \text{ нс}$. Визначити середній шлях, який проходять каони з кінетичною енергією, яка в $\eta = 1,2$ рази перевищує їх енергію спокою.
260. Мезон космічних променів має кінетичну енергію $W = 7M_0c^2$, де M_0 – маса спокою мезона. У скільки разів власний час життя такого мезона менший часу його життя, відрахованого у системі відліку, яка пов'язана з лабораторією?
261. Обґрунтуйте розпад антинейтрона. Запишіть реакцію розпаду.
262. При зіткненні нейтрона з антинейтроном відбувається їх анігіляція, в результаті чого виникають два γ -кванти, а енергія частинок переходить в енергію γ -квантів. Визначити енергію кожного γ -кванта, враховуючи, що кінетичною енергією нейтрона і антинейтрона до їх зіткнення можна знехтувати.

263. Напишіть позначення, яких бракує в наведених реакціях, враховуючи їх протікання цілком можливим: 1) $x + n \rightarrow p + e^-$; 2) $x + n \rightarrow p + \mu^-$; 3) $x + p \rightarrow n + e^+$.
264. Визначте, які з нижче наведених процесів дозволені законом збереження лептонного числа: 1) $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$; 2) $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$; 3) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^- + e^+$; 4) $K^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e$.
265. Чи можливі нижче наведені розпади: 1) $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$; 2) $K^- + n \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0$? Поясніть причину.
266. Позасистемними одиницями дози опромінення є рентген та Дж/м³. Обчислити співвідношення між ними для повітря, вважаючи, що середня енергія дисоціації його молекул $E_g = 33 \text{ eV}$. Встановити також співвідношення між одиницями дози поглинання граєм та експозиційної дози – рентгеном.
267. Робітник працює з γ -радіоактивним препаратом, причому гранична припустима доза опромінення становить 0,017 Р/добу. Протягом робочого дня, який триває $t = 6$ годин, дозиметр фіксує середню потужність дози $P = 0,5 \text{ мкР/с}$. Чи одержить робітник під час роботи з препаратом дозу опромінення, більшу за граничну, якщо опроміненням з боку інших джерел нехтувати?
268. Вузкий пучок γ -випромінювання, енергія якого $\epsilon_\gamma = 6 \text{ MeV}$, пронизує бетонну стіну завтовшки $l_1 = 1 \text{ м}$. Якою має бути товщина залізної стіни l_2 , щоб спричинити таке саме ослаблення цього пучка?
269. Пластинка з деякої речовини ослаблює γ -випромінювання в $k = 1000$ разів. Скільки шарів половинного поглинання містить така пластинка?
270. Товщина h шару перекриття, яке послаблює дане іонізуюче випромінювання у 2 рази, має назву товщини шару половинного послаблення. Довести, що шар завтовшки $H = nh$ послаблює випромінювання в 2^n раз.
271. Найкраще за все нейтронне випромінювання послаблює вода (у 4 рази краще, ніж бетон, і в 3 рази краще, ніж свинець). Товщина шару половинного послаблення нейтронного випромінювання для води дорівнює 3 см. У скільки разів послабить нейтронне випромінювання шар води завтовшки 30 см?
272. Гамма-випромінювання найкраще за все вбирає свинець (в 1,5 рази краще, ніж сталеві броня, і в 22 рази, ніж вода). Товщина шару половинного послаблення γ -променів для свинцю дорівнює 2 см. Шар свин-

- цю якої товщини потрібний, щоб послабити γ -випромінювання в 128 раз?
273. Середня увібрана доза випромінювання співробітником, який працює з радіоактивними речовинами, дорівнює 7 мкГр за 1 годину. Чи безпечна робота співробітника протягом 200 днів на рік по 6 годин щодня, якщо гранично допустима доза опромінення становить 50 мГр на рік?
 274. В установках для γ -опромінення у сільському господарстві використовують β -радіоактивний ізотоп цезію ${}_{55}\text{Cs}^{137}$. Написати реакцію β -розпаду. Визначити максимальну частоту γ -випромінювання, якщо найбільша енергія γ -квантів дорівнює $0,66 \text{ MeV}$. Обчислити релятивістську швидкість β -частинок, якщо вони мають енергію $1,18 \text{ MeV}$.
 275. Електрон і позитрон, які мали однакові кінетичні енергії, рівні 240 кеВ , при зіткненні перетворилися у два однакові фотони. Визначити енергію кожного фотона й відповідну йому довжину хвилі.
 276. Вільний нейтрон розпадається за схемою: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Визначити загальну кінетичну енергію всіх частинок після розпаду. Кінетичною енергією нейтрона і масою спокою антинейтрино знехтувати.
 277. При утворенні електрона і позитрона з фотона енергія фотона була рівна $2,62 \text{ MeV}$. Чому була рівна повна кінетична енергія позитрона і електрона у момент виникнення?
 278. Користуючись значеннями фундаментальних констант h , c і G , визначити планківську довжину.
 279. Користуючись значеннями фундаментальних констант h , c і G , визначити планківську масу.
 280. Користуючись значеннями фундаментальних констант h , c і G , визначити планківський час.

7. Таблиці деяких фізичних величини

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	$R = 1,0973 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
9.	Маса спокою електрона	$m_e = 9,1093 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ а.о.м.} = 0,511 \text{ MeV}$
10.	Маса спокою протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.о.м.} = 938,281 \text{ MeV}$
11.	Маса спокою нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.о.м.} = 939,567 \text{ MeV}$
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	$\lambda = 2,4263 \cdot 10^{-12} \text{ м}$

7.2. Періоди піврозпаду деяких радіоактивних нуклідів

1_0n	11,7 хвилин	${}^{95}_{40}\text{Zr}$	65,5 доби	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	3,82 доби
${}^{14}_6\text{C}$	5730 років	${}^{124}_{53}\text{I}$	4,15 доби	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	1620 років
${}^{24}_{11}\text{Na}$	14,96 годин	${}^{131}_{53}\text{I}$	8,05 доби	${}^{231}_{90}\text{Th}$	25,52 години
${}^{28}_{13}\text{Al}$	2,31 хвилин	${}^{134}_{53}\text{I}$	52 хвилини	${}^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{11}$ років
${}^{32}_{15}\text{P}$	14,28 доби	${}^{132}_{55}\text{Cs}$	6,59 доби	${}^{235}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$ років
${}^{55}_{27}\text{Co}$	18,2 години	${}^{192}_{77}\text{Ir}$	75 діб	${}^{238}_{92}\text{U}$	$4,51 \cdot 10^9$ років
${}^{60}_{27}\text{Co}$	5,26 доби	${}^{210}_{83}\text{Bi}$	5,02 доби	${}^{239}_{94}\text{Pu}$	24390 років
${}^{90}_{38}\text{Sr}$	27,7 років	${}^{210}_{84}\text{Po}$	138 діб	${}^{26}_{10}\text{Ku}$	0,3 секунди

7.3. Массы некоторых ядер

Ядро	Масса, а.о.м.	Ядро	Масса, а.о.м.	Ядро	Масса, а.о.м.
${}_0n^1$	1,008665	${}_7N^{14}$	13,999174	${}_{13}Al^{28}$	27,971131
${}_1H^1$	1,007276	${}_7N^{15}$	14,956198	${}_{14}Si^{28}$	27,975900
${}_1D^2$	2,013673	${}_8O^{15}$	14,999115	${}_{14}Si^{30}$	29,970770
${}_1T^3$	3,015010	${}_8O^{16}$	15,990968	${}_{15}P^{31}$	30,971761
${}_2He^3$	3,017818	${}_8O^{17}$	16,995030	${}_{26}Fe^{56}$	55,930471
${}_2He^4$	4,001631	${}_9F^{18}$	17,996138	${}_{27}Co^{58}$	57,930776
${}_3Li^6$	6,012954	${}_9F^{19}$	18,993707	${}_{38}Sr^{90}$	89,901711
${}_3Li^7$	7,015113	${}_9F^{20}$	19,994931	${}_{84}Po^{210}$	209,974760
${}_4Be^7$	7,015914	${}_{10}Ne^{19}$	19,030666	${}_{86}Rn^{222}$	222,012419
${}_5B^{11}$	11,006625	${}_{10}Ne^{20}$	20,022162	${}_{88}Ra^{226}$	226,021261
${}_6C^{12}$	12,000000	${}_{10}Ne^{21}$	21,026539	${}_{92}U^{235}$	234,986136
${}_6C^{13}$	13,000244	${}_{11}Na^{23}$	22,983439	${}_{92}U^{238}$	237,990587
${}_6C^{14}$	14,00263	${}_{11}Na^{24}$	23,984097	${}_{92}U^{239}$	239,044138
${}_7N^{13}$	13,001761	${}_{13}Al^{27}$	26,976360	${}_{94}Pu^{239}$	239,002011

Навчально-методичне видання

Богатирьов Олег Іванович

Фізика ядра

Навчально-методичний посібник
для студентів фізичних спеціальностей

Редактор: *Богатирьов Олег Іванович*

Коректор: *Матвіян Наталія Іванівна*

Комп'ютерний набір: *Колісник Людмила Іванівна*

Верстка: