

Атомно-ядерна фізика.
Частина 2. Ядерна фізика
Програма. 2 змістові модулі

(6-й семестр, 34 години лекцій та самостійна робота-20 годин)
 (дві контрольні роботи)

Змістовий модуль 1

Тема 1. Стислий нарис розвитку вчення про структуру ядра

Протонно-електронна модель ядра. Залежність характеру спіну ядра від парності числа частинок. Азотна катастрофа. Експерименти В. Боте і Г. Беккера з реакції взаємодії альфа-частинок з ядрами. Відкриття Дж. Чедвіком нейтрона. Протонно-нейтронна модель ядра. Ядерні взаємодії. Масштаби енергії, відстані та часу в ядерній фізиці.

Тема 2. Статичні властивості ядер

Класифікація ядер. Ізотопи, ізобари, ізотони. Заряд ядра, експериментальні методи його вимірювання: Використання формули Мозлі та Оже-ефекту. Маса ядра, експериментальні методи її вимірювання: мас-спектрограф та мас-спектрометр Астона. Визначення питомої енергії зв'язку ядра. Емпірична залежність питомої енергії зв'язку ядра від масового числа. Властивості ядерних сил – перше наближення. Краплинна модель ядра: Напівемпірична формула для визначення енергії зв'язку ядра (формула Вейтзеккера). Використання формули Вейтзеккера для визначення масового числа та заряду стабільного ізобару ($A=const.$). Обчислення енергії поділу ядер із емпіричної залежності енергії зв'язку ядра від масового числа. Визначення радіусу ядер зв'язок радіусу ядра з масовим числом. Експериментальне визначення сталої r_0 : із аналізу формули Вейтзеккера, із розсіювання нейтронів, та високо енергетичних електронів.. Спін та магнітний момент ядра – надтонке розщеплення спектральних ліній. Спектроскопічні методи визначення спінів ядер. Вимірювання магнітних моментів атомів та ядер. Метод Штерна і Герлаха. Метод магнітного резонансу для вимірювання магнітних моментів ядер (метод Рабі). Вимірювання магнітного моменту нейтрона за допомогою магнітних дзеркал. Систематика спінів та магнітних моментів ядер (модель Шмідта) Парність хвильових функцій ядер, закони збереження парності в ядерній фізиці. Форма ядра, електричний дипольний момент ядра. Квадрупольний момент ядра та методи його вимірювання. Емпірична залежність квадрупольного моменту ядра від кількості протонів або нейтронів. Деформовані ядра.

Тема 3. Фізичні засади роботи детекторів частинок та детекторів випромінювання

(для самостійного вивчення)

1. Характеристики детекторів: ефективність, просторовий та часовий розділ, мертвий час та час відновлення.
2. Фізичні засади роботи камери Вільсона, дифузійної та бульбашкової камери.
3. Фізичні засади роботи іонізаційної камери, пропорційного лічильника, та лічильника Гейгера-Мюллера.
4. Фізичні засади роботи сцинтиляційного та Черенковського лічильника.
5. Фізичні засади роботи напівпровідникових детекторів та ядерних фотоємльсій.

Література.

Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. Ч. 2. Ядерная физика. Гл. 12, п. 86.

А.К. Вальтер, И.И. Залюбовский. Ядерная физика. Гл. 4.

К.Н. Мухин. Введение в ядерную физику. Гл. 4.

Задачі до контрольної роботи №1

1. Знайти відсотковий уміст ізотопу $^{13}_6\text{C}$ в природному вуглеці, який складається із ізотопів $^{12}_6\text{C}$ та $^{13}_6\text{C}$. Атомна маса природного вуглецю $M(\text{C})=12.01115$, а ізотопна $M(^{13}_6\text{C})=13,03354$ а. о. м.

Вказівка

Використати визначення атомної одиниці маси (а.о.м.), тобто $M(^{12}_6\text{C})=12.0$. Таким чином $xM(^{13}_6\text{C})+(1-x)M(^{12}_6\text{C})=M(\text{C})$. Звідки дістанемо: $x=0,011=1,1\%$.

2. Порівняти гравітаційну, кулонівську та ядерну енергії двох взаємодіючих протонів на відстані $r=1$ фермі. ($G_0=6,67 \times 10^{-8}$ см³×г×с, $m_p=1,67 \times 10^{-24}$ г, $e=4,8 \times 10^{-10}$ СГСг). Енергію ядерної взаємодії вважати такою, що дорівнює середній енергії зв'язку одного нуклона в ядрі.

Вказівка

Використати закон всесвітнього тяжіння $E_{\text{грав}}=G_0 \cdot m_p \cdot m_p / r$, де G_0 —гравітаційна стала, m_p —маса протона, r —відстань між протонами, а також закон Кулона $E_{\text{кул}}=e \cdot e / r$, де e —заряд протона. Після обчислення маємо: $E_{\text{грав}}=10^{-43}$ еВ, $E_{\text{кул}}=1,2$ МеВ, $E_{\text{ядер}}=8$ МеВ.

3. Довести, що в протоні не може міститись електрон як структурна частинка.

Вказівка

Скористаємось принципом невизначеностей Гайзенберга $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq h/2\pi$, де h —стала Планка ($h=6,63 \cdot 10^{-27}$ ерг·с). Вважаючи невизначеність в координаті рівною розміру протона $\Delta x=1,3$ ф, а невизначеність в імпульсі рівною самому імпульсу електрона $\Delta p_x=p_e$, матимемо $p_e \geq h/(2\pi \Delta x)$. Для обчислення енергії необхідно скористуватись релятивістським зв'язком між енергією і імпульсом електрона $E_e=p_e c$, де c —швидкість світла. Кінцевий результат: $E_e=150$ МеВ. Ця енергія значно перевищує кулонівську енергію взаємного притягання електрона і протона, тому електрон покине протон.

4. Скільки потрібно часу нейтрону, який має енергію $K_n=20$ МеВ, щоб перетнути ядро $^{23}_{11}\text{Na}$? Маса нейтрона $m_n=1,67 \times 10^{-24}$ г. Що використовується як природна одиниця часу тривалості ядерних процесів?

Вказівка

Ядро вважати сферичним з радіусом $R_{\text{я}}=r_0 A^{1/3}$, де r_0 —параметр який дорівнює $1,3 \times 10^{-13}$ см, а A —масове число. Швидкість нейтрона визначимо із кінетичної енергії. Тоді час t , необхідний для перетину відстані $2R_{\text{я}}$, буде дорівнювати $t=2r_0 A^{1/3} / \sqrt{2T_n / m_n}$, звідки $t \approx 10^{-22}$ с.

5. Оцінити густину ядерної матерії ($\rho_{\text{я}}$), концентрацію нуклонів ($N_{\text{нук}}$) та об'ємну густину електричного заряду в ядрі ($\rho_{\text{зар}}$).

Вказівка

Для визначення зазначених характеристик, об'єм ядра визначаємо через його радіус $V_{\text{я}}=4/3\pi R_{\text{я}}^3$, де $R_{\text{я}}=r_0 A^{1/3}$, а $r_0=1,3 \times 10^{-13}$ см. Масу ядра з достатньою точністю можна вважати $M_{\text{я}}=A m_n$, де m_n —маса нуклона $m_n=1,67 \times 10^{-24}$ г. Таким чином, $\rho_{\text{я}}=3m_n/4\pi r_0^3$,

$N_{\text{нук}} = 3/4 \pi r_0^3$. Для визначення об'ємної густини електричного заряду в ядрі зробимо припущення, що $Z=A/2$, тоді $\rho_{\text{зар}} = 3e/2\pi r_0^3$ (елементарний заряд $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$).

6. Визначити густину ядерної матерії та радіус Землі, якщо б вона зі своєю реальною масою ($6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$) мала густину ядерної матерії. Масу нуклона взяти такою, що дорівнює $m_n = 1,67 \times 10^{-27} \text{ кг}$.

Вказівка

Вважаючи форму атомного ядра сферичною, визначимо густину ядерної матерії

$$\rho_{\text{я}} = \frac{Am_n}{4/3\pi R_{\text{я}}^3} \quad (1)$$

Де m_n -маса нуклона, A -масове число, $R_{\text{я}}$ -радіус ядра, причому, $R_{\text{я}} = r_0 A^{1/3}$, а $r_0 = 1,3 \times 10^{-13} \text{ см}$. Підставляючи вираз для радіусу ядра в формулу (1) дістанемо густину ядерної матерії $\rho_{\text{я}} = 3m_n/4\pi r_0^3 = 1,82 \times 10^{14} \text{ г/см}^3$.

Маса Землі $M_3 = 4/3\pi R_3^3 \rho_3$, де ρ_3 - її густина (за умовою задачі вона повинна дорівнювати густині ядерної матерії: $\rho_3 = \rho_{\text{я}}$), R_3 - радіус Землі.

Шуканий радіус Землі при заданих умовах $R_3 \approx \sqrt[3]{\frac{M_3}{4\pi \rho_{\text{я}}}} \approx 200 \text{ м}$.

7. Визначити заряд радіоактивного ядра, для якого енергія K_{α} - випромінювання збудженого атома складає $E_{K\alpha} = 26 \text{ КеВ}$.

Вказівка

Використати закон Мозлі, який встановлює зв'язок між зарядом ядра (Z) і енергією характеристичного K_{α} випромінювання $h\nu_{K_{\alpha}} = 13,6(ZeV)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right)$, де $h\nu = E_{K\alpha}$.

Відповідь $Z=49$ (Индий).

8. Ядро урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ поділяється на два уламки приблизно однакової маси, які розташовані в середині Періодичної таблиці елементів. Користуючись кривою залежності питомої енергії зв'язку від масового числа оцініть енергію, яка вивільнюється в цій реакції.

Вказівка

Згідно закону збереження числа нуклонів, після розподілу ядра урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ утворюються два осколки з масовим числом ~ 117 та декілька вільних нейтронів. Із емпіричного графіка залежності питомої енергії зв'язку (ϵ) від масового числа знайдемо, що для ${}^{238}_{92}\text{U}$ величина $\epsilon(U) = 7,6 \text{ МеВ}$, а для двох уламків - $\epsilon(A=170) = 8,5 \text{ МеВ}$. Таким чином при розподілі вивільнюється енергія $\Delta E = 214 \text{ МеВ}$.

9. Скільки компонентів надтонкої структури мають основні терми атомів тритію ${}^3_1\text{H}_2(^2S_{1/2})$ і берилію ${}^9_4\text{Be}(^1S_0)$? В дужках указані основні терми електронних оболонок атомів.

Вказівка

Скористатись правилами визначення кількості компонентів векторної суми квантово-механічних векторів: $\vec{F} = \vec{J} + \vec{I}$, де \vec{F} - вектор повного моменту атома, \vec{J} - вектор повного моменту електронної оболонки, а \vec{I} - вектор спіну ядра. Для квантових чисел відповідних векторів маємо співвідношення $|J-I| \leq F \leq (J+I)$. Кількість компонентів надтонкої структури (значень N_F) буде визначатись меншим квантовим числом, тобто: якщо $J < I$ то $N_F = (2J+1)$, а якщо $I < J$ то $N_F = (2I+1)$.

Квантове число повного моменту атома J знаходимо із терму атома. Для визначення квантового числа спіну ядра I скористуємось адитивною моделлю Шмідта для підрахунку спіну ядра, яке складається із протонів і нейтронів. Таким чином, основний терм атома тритію матиме дві компоненти, берилію - одну компоненту.

10. Для ядер $^{16}_8\text{O}$ і $^{239}_{94}\text{Pu}$ порівняйте енергії об'ємну, поверхневу та кулонівського відштовхування, якщо сталі в формулі Вейтзеккера дорівнюють $\alpha=14\text{MeV}$; $\beta=13\text{MeV}$; $\gamma=0.75\text{MeV}$.

Вказівка

Використати напівемпіричну формулу Вейтзеккера для обчислення енергії зв'язку ядра з зарядом Z та масовим числом A

$$\Delta W = \alpha A - \beta A \text{MeV} - \kappa \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \kappa \frac{(\frac{A}{2} - Z)^2}{A} + 33.5 \quad \delta^{3/4}$$

де $E_{об}=\alpha A$ - об'ємна енергія, $E_{пов}=\beta A^{2/3}$ - поверхнева енергія, $E_{кул}=\gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}}$ - енергія кулонівського відштовхування.

11. Визначити стабільний ізобар ядер з масовим числом $A=31$.

Вказівка

Стабільним ізобарним ядром буде ядро з найбільшою енергією зв'язку. Дослідивши напівемпіричну формулу Вейтзеккера для обчислення енергії зв'язку ядра на екстремум (див. попередню задачу), вважаючи Z змінним а $A=\text{const}$. дістанемо заряд ядра стабільного ізобара $Z_{cm} = \frac{A}{2+0.015A^{2/3}}$. Підставляючи значення A , маємо $Z_{cm}=15$ ($^{31}_{15}\text{P}$).

12. Визначити електричну потужність атомної електростанції, якщо витрата ізоотопу $^{235}_{92}\text{U}$ складає 235 кг на рік при ККД=31%.

Вказівка

Звісно, що при поділі одного ядра $^{235}_{92}\text{U}$ вивільнюється енергія біля $\epsilon=210\text{MeV}$. Повна енергія, яка вивільнюється при поділі $m=235$ кг $^{235}_{92}\text{U}$ за рік ($t=3,1 \times 10^7$ с) дорівнює добутку кількості ядер, які поділилися ($n_{яд}$), на енергію поділу: $E_{пов}=n_{яд}\epsilon$. Кількість ядер вирахуємо використовуючи число Авагадро $N_A=6.02 \times 10^{23}$ атомів/моль. Електрична потужність (P) атомної електростанції визначається $P = \frac{\epsilon n_{яд}}{t} \cdot \text{ККД}$. Відповідь: 200 МВт.

Контрольна робота з першого модуля включатиме 2 теоретичних питання з лекційного матеріалу, одне питання з самостійної роботи, та дві задачі.

Змістовий модуль 2

Тема 4. Радіоактивний розпад ядер

Енергетична спроможність радіоактивного розпаду та його закон. Альфа-розпад, схема та енергетика альфа-розпаду. Механізм альфа-розпаду. Виведення закону Гейгера-Неттола з використанням тунельного ефекту. Аналіз залежність періоду альфа-розпаду від енергії альфа-частинок (закон Гейгера-Неттола). Бета-розпад. Три типи бета-розпаду, схеми та енергетика β -розпаду. Характер бета-спектрів та гіпотеза нейтрино. Непрямі експериментальні докази існування нейтрино. Визначення маси спокою нейтрино. Прямі експерименти з доведення існування нейтрино (використання працюючого реактора). Механізм β -перетворень. Властивості частинок та античастинок. Анігіляція частинок та античастинок. Закони збереження лептонного та баріонного числа. Гіпотеза Лі та Янга. Експерименти Ву з доведення асиметрії вірогідності вилетіти електронам при просторові інверсії. Елементи теорії бета-розпаду. Незбереження парності при бета-розпаді. Гама-випромінювання ядер. Закони збереження енергії, моменту імпульсу, парності при гама-випромінюванні. Імовірність гама-переходів, її залежність від характеристик ядер в початковому і кінцевому стані. Внутрішня конверсія гама-променів, залежність коефіцієнту внутрішньої конверсії від мультипольності випромінювання та енергії переходів. Ефект Мессбауера - резонансного поглинання гама-променів. Вимірювання червоного зсуву в лабораторних умовах з використанням ефекту Мессбауера.

Тема 5. Фізичні засади роботи прискорювачів частинок

(для самостійного вивчення)

1. Фізичні засади роботи електростатичних генераторів. Генератори Ван-де-Граафа, тандемні генератори.
2. Фізичні засади роботи циклічних прискорювачів: циклотрон, бетатрон.
3. Фізичні засади роботи лінійних прискорювачів: резонансні прискорювачі з дрейфовими трубками та на біжучій хвилі.

Література.

Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. Ч. 2. Ядерная физика. Гл. 12, п. 84.

А.К. Вальтер, И.И. Залюбовский. Ядерная физика. Гл. 9.

Тема 6. Ядерні реакції та їх класифікація

1. Ядерні реакції за типом взаємодії: прямі ядерні взаємодії та реакції, які включають компаунд-ядро.
2. Класифікації ядерних реакцій за типом падаючих частинок: нейтронів, заряджених частинок, гама-квантів.
3. Реакції за характером ядерних перетворень: реакції з емісією нейтронів, заряджених частинок, гама-квантів
4. Реакції розподілу важких ядер. Ланцюгові реакції.
5. Реакції синтезу атомних ядер. Термоядерні реакції.

Тема 7. Ядерні сили та моделі атомного ядра

Короткодія та властивості насичення ядерних сил. Незалежність ядерних сил від заряду. Обмінний характер ядерних сил. Мезонна теорія ядерних сил та структура

нуклонів. Модель ядерних оболонок. Експериментальне та теоретичне обґрунтування моделі. Принципи побудови оболонкової моделі ядра. Одночастинкові стани, отримані з розв'язку рівняння Шредінгера для різних потенціалів. Ідея М. Гепперт-Майер та Йенсена що до великого внеску енергії спин-орбітальної взаємодії. Узагальнена модель ядра – одночастинкові та колективні збудження у цій моделі.

Тема 8. Космічні промені та елементарні частинки

Первинне та вторинне космічне випромінювання: склад, висотний та енергетичний розподіл космічних променів. Проходження космічного випромінювання крізь атмосферу. Каскадні процеси. Походження космічних променів, процеси взаємодії частинок з ядрами атмосфери та їх перетворення. Еволюція зірок, спалах наднових зірок. Класифікація елементарних частинок: фотони, лептони, мезони, баріони. Закони збереження при перетворенні частинок. Кваркова модель елементарних частинок.

Задачі до контрольної роботи №2

13. Яка частка початкової кількості радіоактивного ізотопу розпадеться за час, який дорівнює середній тривалості життя цього ізотопу?

Вказівки

Якщо N_0 - початкова кількість ядер, які не розпалися на момент часу $t=0$, а N - кількість ядер, які залишилися на момент часу t , то за час t доля ядер, які розпалися дорівнює

$$p=(N_0-N)/N_0. \quad (1)$$

Згідно з законом радіоактивного розпаду

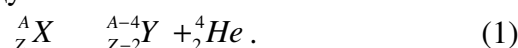
$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

де λ -стала розпаду. Середній час життя $\tau=1/\lambda$. За умови задачі $t = \tau$ із закону радіоактивного розпаду $N = N_0 e^{-1}$. Підставляючи цей вираз в формулу (1), матимемо $p=1-e^{-1}$. Звідки $p=0,632$.

14. Довести, що енергія, яка вивільнюється в альфа-розпаді важкого ядра, практично повністю забирається альфа-частинкою.

Вказівки

Запишемо схему α -розпаду



Згідно закону збереження енергії, для α -розпаду

$$m_X c^2 = m_Y c^2 + m_\alpha c^2 + K_Y + K_\alpha, \quad (2)$$

де K_Y і K_α - кінетична енергія дочірнього ядра та α -частинки, відповідно. Вважаємо, що початкова енергія материнського ядра дорівнює нулю. В системі центру мас повна енергія, яка виділяється при α -розпаді, дорівнює із (2)

$$\Delta E = (m_X - m_Y + m_\alpha) c^2 = K_Y + K_\alpha. \quad (3).$$

Згідно закону збереження імпульсу $m_\alpha v_\alpha = m_Y v_Y$, або $m_\alpha K_\alpha = m_Y K_Y$. Вважаючи, що масове число α -частинки дорівнює 4, а для дочірнього ядра $(A-4)$, останній вираз можемо записати у вигляді

$$4K_\alpha = (A-4)K_Y, \text{ звідки } K_Y = 4K_\alpha / (A-4). \text{ Остільки } \Delta E = K_Y + K_\alpha, \text{ то}$$

$$K_\alpha = \Delta E (A-4) / A.$$

Для важких ядер величина A значно більша 4, а тому $A-4 \approx A$ і $K_\alpha \approx \Delta E$, а $K_Y \approx 0$.

15. Яка частка початкової кількості ядер ${}_{38}^{90}\text{Sr}$ залишиться через 40 і 120 років, якщо період напіврозпаду становить $T_{1/2} = 28$ років.

Вказівки

Згідно з законом радіоактивного розпаду кількість ядер, які залишилися на момент часу t , дорівнює

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

Скориставшись зв'язком між періодом напіврозпаду і сталою радіоактивного розпаду (λ)

$T_{1/2} = 0,693/\lambda$, дістанемо $N = N_0 e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}}$, або

$$p = N/N_0 = e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}}. \quad (2)$$

Таким чином, $p(40) = 0,37$, а $p(120) = 0,05$.

16. Оцінити вік стародавніх дерев'яних предметів, у яких питома активність ${}^6\text{C}$ складає $p = 3/5$ питомої активності цього ж нукліда в щойно зрубаних деревах. Період піврозпаду ${}^6\text{C}$ складає $T_{1/2} = 5570$ років.

Вказівка

Скористаємось рівнянням (2) (див. попередню задачу), $p = N/N_0 = e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}}$. Підставляючи

значення $p = 3/5$, маємо $\frac{3}{5} = e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}}$. Звідки $t = \ln(5/3)T_{1/2}/0,693 = 0,51T_{1/2}/0,693$

Відповідь: 4100 років.

17. Чи можливий β^+ розпад радіоактивного ядра атома ${}^4_7\text{Be}$ в атом ${}^3_7\text{Li}$ якщо їх маси дорівнюють 7,016981 і 7,016005 а.о.м. відповідно?

Вказівки

Запишемо схему β^+ розпаду: ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e$. β^+ розпад можливий, якщо маса материнського ядра ${}^A_Z X$ більша маси дочірнього ${}^A_{Z-1} Y$ на дві маси електрона ($m_e \approx 5,5 \cdot 10^{-4}$ а.о.м.), тобто:

$$M_{\text{ат}}(A, Z) > M_{\text{ат}}(A, Z-1) + 2m_e$$

За умов задачі запишемо $M_{\text{ат}}({}^4_7\text{Be}) > M_{\text{ат}}({}^3_7\text{Li}) + 2m_e$, або $M_{\text{ат}}({}^4_7\text{Be}) - M_{\text{ат}}({}^3_7\text{Li}) > 2m_e$.

Підставляючи значення мас, знайдемо, що різниця мас материнського і дочірнього ядер дорівнює 0,000976 а.о.м. а $2m_e \approx 0,0011$ а.о.м. Тобто, нерівність не виконується і β^+ розпад не можливий. Що буде з радіоактивним ядром?

18. Визначити, який ізотоп утворюється з ${}_{92}^{238}\text{U}$ внаслідок послідовних трьох α -розпадів та двох β^- -розпадів. Напишіть загальну схему розпаду.

Вказівка

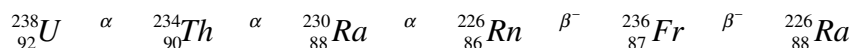
Альфа та β^- -розпади проходять згідно наступним правилам зміщення:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2\text{He}. \quad (1)$$

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1}e + {}^0_0\nu_e \quad (2)$$

Тобто, внаслідок α -розпаду масове число дочірнього ядра зменшується на 4, а зарядове число – на 2 одиниці, в наслідок β^- -розпаду масове число дочірнього ядра не змінюється, а зарядове число збільшується на одиницю.

Таким чином загальна схема розпаду буде така:

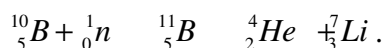


Внаслідок указаних розпадів утворюється ізотоп радію (${}_{88}^{226}\text{Ra}$).

19. Внаслідок захвату нейтрона з ядром ${}^5_{10}\text{B}$ спостерігається вивільнення альфа-частинки. Яке ядро з'явилося як результат цієї реакції?

Вказівка

Масове число (загальна кількість нуклонів) початково дорівнює $A=10+1=11$, а зарядове число $Z=5+0=5$. Згідно законів збереження кількості нуклонів та електричних зарядів в ядерних реакціях, масове та зарядове число компаунд ядра повинні мати ті ж значення, тобто $Z=5$, $A=11$, це ${}^5_{11}\text{B}$. Компаунд ядро розпадається на альфа-частинку ${}^2_4\text{He}$ а залишається ядро, яке має $A=11-4=7$, а $Z=5-2=3$. В періодичній системі елементів вони відповідають ${}^3_7\text{Li}$. Запишемо реакцію в розгорнутому вигляді:



20. Знайдіть кінетичну енергію продуктів реакції ${}^5_{10}\text{B}(n, \alpha){}^3_7\text{Li}$, яка відбувається внаслідок взаємодії повільних нейтронів з нерухомими ядрами бору, якщо енергія цієї реакції складає 2,8 МеВ.

Вказівки

Запишемо реакцію в розгорнутому вигляді ${}^5_{10}\text{B} + {}^0_1n \rightarrow {}^3_7\text{Li} + {}^2_4\text{He}$. Оскільки ядра мішені нерухомі, а нейтрони – повільні, то закон збереження енергії матиме вигляд:

$$Q = K_{\text{яд}} + K_{\alpha}, \quad (1)$$

де $T_{\text{яд}}$ - кінетична енергія ядра віддачі, а T_{α} - кінетична енергія альфа-частинки.

Для визначення цих енергій скористаємось законом збереження імпульсу, вважаючи, що сумарний імпульс продуктів реакції дорівнює нулю:

$$p_{\text{яд}} = p_{\alpha} \quad (2).$$

Оскільки кінетична енергія ядер-продуктів реакції значно менша енергії спокою цих ядер (загальна енергія не більша за енергію реакції 2,8 МеВ), то можна скористатися класичною формулою $p^2 = 2mT$ і переходячи від імпульсів ядер до їх кінетичних енергій, маємо

$$m_{\text{яд}}K_{\text{яд}} = m_{\alpha}K_{\alpha} \quad (3)$$

Розв'язавши систему (1) і (3), дістанемо:

$$K_{\text{яд}} = Qm_{\alpha} / (m_{\alpha} + m_{\text{яд}})$$

$$K_{\alpha} = Qm_{\text{яд}} / (m_{\alpha} + m_{\text{яд}})$$

Маси ядер з достатньою точністю можна вважати рівними масовим числам (у відносних одиницях). Підставляючи ці значення, маємо: $K_{\text{яд}} = 0,2 \text{ МеВ}$, $K_{\alpha} = 2,6 \text{ МеВ}$.

21. Нерухоме ядро ${}^{213}_{84}\text{Po}$ випромінює α -частинку з кінетичною енергією $T_{\alpha}=8,34\text{МеВ}$. При цьому дочірнє ядро опинилося в основному стані. Знайти повну енергію, яка вивільнюється в цьому процесі.

Вказівка

Шукана енергія визначається як енергія альфа розпаду E_{α} і дорівнює сумі кінетичних енергій продуктів розпаду, альфа-частинки (K_{α}) і ядра віддачі ($K_{\text{яд}}$), тобто:

$$E_{\alpha} = K_{\text{яд}} + K_{\alpha} \quad (1)$$

Оскільки кінетична енергія ядер-продуктів реакції значно менша енергії спокою цих ядер, то можна скористатися класичною формулою $p^2 = 2mT$ і переходячи від імпульсів ядер до їх кінетичних енергій, маємо

$$m_{\text{яд}}K_{\text{яд}} = m_{\alpha}K_{\alpha} \quad (2)$$

Підставляючи значення K_α із (2) в (1), матимемо: $E_\alpha = \frac{m_\alpha}{m_{яд}} K_\alpha + K_\alpha = K_\alpha (1 + \frac{m_\alpha}{m_{яд}})$. Маса ядер з достатньою точністю можна вважати рівними масовим числам (у відносних одиницях), тоді $E_\alpha = 8,5 \text{ MeV}$.

22. Нехтуючи енергією зв'язку K -електрона визначити енергію ядра віддачі при K -захопленні в ядрі ${}^7_4\text{Be}$, якщо маси атомів ${}^7_4\text{Be}$ и ${}^7_3\text{Li}$ дорівнюють 7.016981 та 7.016005 а.о.м., відповідно.

Вказівка

Запишемо реакцію K -захоплення ${}^7_4\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \bar{\nu}_e$. Енергія K -захоплення

$E_{\text{кам}} = [M({}^7_4\text{Be}) - M({}^7_3\text{Li})]c^2$ розподіляється між ядром віддачі і електронним нейтрино. Згідно законів збереження енергії та імпульсу

$$E_{\text{кам}} = K_{\text{яд}} + K_{\bar{\nu}_e} \quad (1)$$

$$p_{\text{яд}} = p_{\bar{\nu}_e} \quad (2)$$

Скориставшись зв'язком між кінетичною енергією і імпульсом ядра віддачі

$K_{\text{яд}} = \frac{p_{\text{яд}}^2}{2m_{\text{яд}}}$ а також між кінетичною енергією і імпульсом нейтрино $K_{\bar{\nu}_e} = \frac{p_{\bar{\nu}_e}^2}{2m_{\bar{\nu}_e}}$ і

підставляючи в (1), дістанемо: $E_{\text{кам}} = K_{\text{яд}} + \frac{K_{\text{яд}}^2}{m_{\text{яд}}}$. Враховуючи, що $K_{\text{яд}} = m_{\text{яд}}c^2$, матимемо $K_{\text{яд}} = E_{\text{кам}} / 2m_{\text{яд}}c^2 = 65 \text{ keV}$.

23. Показати можливість α -распаду ядра ${}^{210}_{84}\text{Po}$ в ядро ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, якщо їх маси дорівнюють 209.982866 та 205.974446 а.о.м., відповідно. Яка енергія випроміненої α -частинки, якщо $m_\alpha = 4.002603$ а.о.м.?

Вказівка

Енергетична спроможність α -распаду ядра має такий вигляд

$$\Delta W_\alpha = [M_{\text{ам}}(A-4, Z-2) + m_\alpha - M_{\text{ам}}(A, Z)]c^2 < 0$$

Підставляючи значення мас ядер, знайдемо $\Delta W_\alpha = -5,42 \text{ MeV}$. Таким чином, α -распад можливий. Енергія α -распаду ядра $E_\alpha = |\Delta W_\alpha|$ а енергія випроміненої α -частинки

визначається $K_\alpha = E_\alpha M_{\text{Pb}} / (M_{\text{Pb}} + m_\alpha) = 5,3 \text{ MeV}$.

24. Розпад нерухомих ядер ядра ${}^{210}_{84}\text{Po}$ проходить з основного стану і супроводжується появою двох груп α -частинок: основної з енергією $K_\alpha = 5,3 \text{ MeV}$ та малої інтенсивності з енергією $K_\alpha = 4,5 \text{ MeV}$. Знайти енергію α -распаду цих ядер та енергію γ -квантів випромінюваних дочірніми ядрами.

Вказівка

Використовуючи розв'язання попередньої задачі, маємо енергію α -распаду

$E_\alpha = K_\alpha M_{\text{Pb}} / (M_{\text{Pb}} + m_\alpha) = 5,4 \text{ MeV}$, а енергія випромінюваних γ -квантів буде дорівнювати

$h\nu = (K_\alpha - K_{\text{яд}}) M_{\text{Pb}} / (M_{\text{Pb}} + m_\alpha) = 0,815 \text{ MeV}$.

Контрольна робота з другого модуля включатиме 2 теоретичних питання з лекційного матеріалу, одне питання з самостійної роботи, та дві задачі.

