

Волинський національний університет імені Лесі Українки
Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

**Кафедра експериментальної фізики,
інформаційних та освітніх технологій**

Мирончук Галина, Андрій Кевшин, Галян Володимир

ФІЗИКА ЯДРА І ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

Задачі

Луцьк
2022

УДК 539.2
М 33

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол № 1 від 21.09.2022 р.).

Рецензенти: *Луньов С. В.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедри фізики та вищої математики Луцького НТУ;

Шигорін П. П. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедри теоретичної та математичної фізики імені А. В. Свідзинського, ВНУ імені Лесі Українки.

М 33 Мирончук Г.Л., Кевшин А. Г., Галян В.В. **Фізика ядра і елементарних частинок** : задачі. Луцьк : Вежа-Друк, 2022. 28 с.

Задачі з «Фізика ядра та елементарних частинок» – складова комплексу робочих матеріалів написаних на українській мові, створених для забезпечення якісної практичної підготовки фахівців галузей знань 01 Освіта, 10 Природничі науки, галузей знань технічних наук. Видання містить набір задач необхідних для організації повноцінної аудиторної та самостійної роботи студентів.

Навчально-методичне видання відповідає чинним навчальним програмам підготовки й рекомендовано студентам спеціальностей 014 Середня освіта (Фізика), 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали, спеціальностей галузей технічних наук.

УДК 539.2
© Мирончук Г.Л., Кевшин А.Г.,
Галян В.В., 2022
© Вежа-Друк, 2022

ЗМІСТ	
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ АТОМНИХ ЯДЕР. ЯДЕРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ. ДЕФЕКТ МАС. ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ	6
Приклади розв'язання задач	8
Задачі для самостійного розв'язання	9
РОЗДІЛ 2. ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ВИХІД ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ	12
Приклади розв'язання задач	14
Задачі для самостійного розв'язання	16
РОЗДІЛ 3. РУХ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТА МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ	19
Приклади розв'язання задач	19
Задачі для самостійного розв'язання	22
ДОДАТКИ	25
ЛІТЕРАТУРА	27

Вступ

Дисципліна «Фізика ядра і елементарних частинок» є частиною курсу загальної фізики. Предметом вивчення навчальної дисципліни є основні фундаментальні уявлення про характеристики стабільних/нестабільних ядер, експериментальні методи досліджень ядер та ядерних сил, моделі атомних ядер, природні та штучні перетворення ядер, використання ядерних реакцій у енергетиці, космічне випромінювання та характеристики елементарних частинок.

Збірник задач з навчальної дисципліни „Фізика ядра і елементарних частинок” з методичними рекомендаціями до їх розв’язання складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки „бакалавр” спеціальностей «Прикладна фізика та наноматеріали», «Середня освіта (Фізика)», «Фізика та астрономія». Даний посібник має метою допомогти студентам у самостійному розв’язанні задач з фізики ядра та елементарних частинок.

Предметом вивчення навчальної дисципліни «Фізика ядра і елементарних частинок» є властивості атомних ядер, елементарних частинок, методи та прилади для досліджень цих об’єктів, а також типи взаємодій, що існують у природі на макрорівні.

Метою даної дисципліни є висвітлення фізичної суті і змісту положень та понять фізики ядра і елементарних частинок. Формування активного методу мислення при розгляді явищ мікросвіту. Одержання навичок застосування фундаментальних знань до розв’язку конкретних практичних та інженерних задач. Формування навичок експериментальної роботи з фізичними приладами для вимірів радіоактивності, дослідження ядерних реакцій та космічного випромінювання. Ознайомлення студентів з нерозривним зв’язком фізики з технікою та іншими науками. Дати студентам початкові відомості про фізичні процеси, на яких ґрунтується дія ядерних реакторів.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Фізика ядра і елементарних частинок» є:

- формування у студентів наукового мислення, розуміння границь застосування фізичних теорій та вміння оцінювати ступінь достовірності одержаних за їх допомогою результатів;
- вивчення студентами будови та принципу роботи основних дозиметричних приладів, експериментальних методик ядерної фізики;
- ознайомлення студентів із сучасною науковою апаратурою та вироблення в них навичок проведення експериментальних досліджень;
- подання історії фізичної науки та висвітлення внеску українських учених у фундаментальні та прикладні дослідження у галузі фізики ядра і елементарних частинок.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

знати:

- основні поняття і означення;
- закон радіоактивного розпаду;
- типи радіоактивного випромінювання; правила зміщення;
- суть методів виділення та ідентифікації радіоактивних елементів, хімічні властивості радіоактивних елементів;
- особливості процесу поділу ядер урану і можливості його технічної реалізації;
- області використання радіоактивних ізотопів в науці і техніці;
- методи ресстрації радіоактивного випромінювання та їх потенційні можливості для аналізу радіоактивних об’єктів;
- дію йонізуючого випромінювання на організм людини.

вміти:

- охарактеризувати об’єкти дослідження, звернувши увагу на їх особливості;

- пояснити причини стабільності або нестабільності ядер;
- пояснити особливості умов протікання ядерних реакцій;
- записувати хімічні рівняння ядерних реакцій;
- розв'язувати розрахункові задачі за законом радіоактивного розпаду;
- пояснити генетичний зв'язок між елементами і дати характеристику найбільш важливих природних та штучних радіоактивних елементів.

РОЗДІЛ 1. БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ АТОМНИХ ЯДЕР. ЯДЕРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ. ДЕФЕКТ МАС. ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ

Ядерна фізика – це розділ фізики, в якому вивчають структуру і властивості атомних ядер і їх перетворення: процеси радіоактивного розпаду і ядерні реакції.

За сучасною теорією будови атом – це електронейтральна система, яка складається з позитивно зарядженого ядра та негативно зарядженої електронної оболонки. Позитивний заряд ядра атома чисельно дорівнює порядковому номеру елемента у періодичній системі.

Найважливішими характеристиками атомного ядра є його електричний заряд $q_{\text{я}}$ та маса $m_{\text{я}}$. Оскільки атом в цілому електронейтральний, заряд ядра визначає кількість електронів у атомі, тобто порядковий номер хімічного елемента:

$$q_{\text{я}} = Ze$$

Ціле число Z називають *зарядовим числом*. Зарядове число збігається з порядковим номером хімічного елемента в періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва.

Для позначення різних ізоотопів хімічних елементів використовують запис: ${}^A_Z X$, де X – символічне позначення хімічного елемента, A – масове число, тобто ціле число, найближче до атомної маси елемента, вираженої в а.о.м., Z – порядковий номер хімічного елемента. Дослідженням ізоотопів займався англійський радіохімік Ф. Содді, який і ввів це поняття в 1913 р. Саме Ф. Содді вперше запропонував розміщувати хімічні елементи в періодичній системі не за атомною масою, як Д.І. Менделєєв, а за електричним зарядом ядра (спосіб вимірювання зарядового числа запропонував англійський фізик Г. Мозлі у 1913 р.). Тобто в одній клітинці Содді розміщував декілька ізоотопів з різними атомними масами. Така традиція збереглася і донині.

Маси атомів зручно вимірювати в атомних одиницях маси (а.о.м.). За 1 а.о.м. прийнято 1/12 частину маси вуглецю ($1 \text{ а.о.м.} = 1,6605655(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$). Виявилось, що існують речовини з однаковим зарядовим числом Z , проте з різною масою ядра $m_{\text{я}}$. Такі різновиди хімічних елементів називають *ізотопами* (гр. isos – однаковий + topos – місце). Наприклад, у водню таких ізоотопів три: протій (${}^1_1\text{H}$), дейтерій (${}^2_1\text{H}$) та тритій (${}^3_1\text{H}$). Ізотопи займають одну і ту ж клітинку в періодичній системі елементів. На даний час відомо більше 1500 ізоотопів різних хімічних елементів. Атомну масу ізоотопу називають *ізоотною масою*.

Існують також ядра, що мають однакове масове число A , проте різні зарядові числа Z . Такі хімічні елементи називають *ізобарами* (гр. isos – однаковий + baros – вага). Відкрив ізобари англійський фізик Ф.В. Астон.

Протони і нейтрони – це основні елементарні частинки, з яких складається ядро атома. Протон і нейтрон є двома зарядовими станами ядерної частинки, яка називається *нуклоном*.

Число протонів в ядрі (порядковий номер елемента) прийнято позначати через Z , число нейтронів – через N . Їх сума $A=Z+N$ називається масовим числом ядра. Атоми з однаковим Z (тобто атоми одного і того ж елемента), але з різними N називаються *ізотопами*, з однаковими A , але з різними Z – *ізобарами*, з однаковими N , але з різними Z – *ізотонами*.

Основна відмінність між протоном і нейтроном полягає в тому, що протон – заряджена частинка, заряд якої $e=1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Це елементарний заряд, чисельно рівний заряду електрона. Нейтрон – електрично нейтральна частинка.

Протони і нейтрони утримуються в середині ядра атома за допомогою сил, які називаються ядерними силами. *Ядерні сили* – це сили притягання, що діють між нуклонами.

Дефект маси – різниця між сумою мас спокою складових його нуклонів (масовим числом) і масою спокою атомного ядра даного ізотопу, вираженої в атомних одиницях маси:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}} = (Zm_p + (A - Z)m_n) - M_{\text{я}}$$

Дефект маси мають практично всі хімічні елементи таблиці Менделєєва. Виняток становить тільки один елемент – це протій, водень, у якого ядро складається з одного протона. Там немає нейтронів. Чим масивніше ядро, чим більше нуклонів входить до його складу, тим і дефект маси буде більшим. Отже, дефект маси дає можливість визначити енергію зв'язку, тобто ту саму енергію, яка захована в ядрі.

Енергія, яку необхідно затратити, щоб розщепити ядро на окремі нуклони називається *енергією зв'язку* ($E_{\text{зв}}$).

Енергія зв'язку, з використанням рівняння Ейнштейна визначається за формулою:

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}) \cdot c^2$$

Якщо масу виразити в а.о.м., то енергія зв'язку обчислюється за формулою

$$E_{\text{зв}} = 931,15 \Delta m$$

оскільки одній атомній одиниці маси відповідає атомна одиниця енергії:

$$1 \text{ а.о.м.} = 1,491 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,5 \text{ МеВ.}$$

Питома енергія зв'язку E_{num} – енергія зв'язку, що припадає на один нуклон. Вона характеризує стійкість (міцність) атомних ядер.

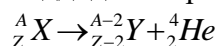
$$E_{\text{num}} = \frac{E_{\text{зв}}}{A}$$

Чим більше питома енергія зв'язку, тим стійкіше ядро.

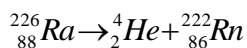
До 1903 були відкриті кілька радіоактивних препаратів, які випромінюють α -, β - і γ -частинки: уран, торій, актиній, радій, полоній. Також було встановлено, що α -частинка – це ядро гелію (${}^4_2\text{He}$), що має заряд ядра 2 та масу 4 а.о.м, β – електрон (${}^0_{-1}e$ або ${}^0_{-1}\beta$) має заряд ядра -1 та масу приблизно 0 а.о.м.

Резерфорд разом із Фредеріком Содді (англійський радіохімік) відкрили правила зміщення при радіоактивному розпаді. За допомогою даного правила можна знайти ядро, яке утвориться внаслідок того чи іншого розпаду.

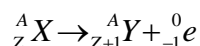
1) Правило зміщення Резерфорда-Содді для α розпаду:



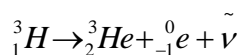
α -розпад зменшує масове число на 4, а зарядове на 2, тобто дочірній елемент зміщується на дві клітки вліво в таблиці Д. І. Менделєєва. Тут виконується закон збереження електричного заряду і закон збереження маси. Наприклад, якщо радій має заряд 88 і масу 226, і випромінює α -частинку, то вийде елемент з зарядовим числом 86 і з масою 222 – радон (інертний газ).



2) Правило зміщення Резерфорда-Содді для β розпаду:



β -розпад не змінює масового числа, зарядове число збільшує на одиницю, тобто дочірній елемент зміщується на 1 клітку вправо. Наприклад:



Приклади розв'язання задач

1. Ядро ізотопу ${}^{14}_7N$ захватило α -частинку і випустило протон. Визначити масове число A і зарядове число Z ядра ізотопу, що утворилося при цьому. Вказати, якому елементу це ядро відповідає.

Дано:



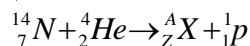
Знайти:

A – ?

Z – ?

Розв'язок

Запишемо рівняння ядерної реакції:



де 4_2He – α -частинка; 1_1p – протон.

Застосуємо закон збереження масових чисел:

$$\sum_{i=1}^n A = const$$

$$14 + 4 = A + 1$$

Отсюда:

$$A = 17$$

Применим закон сохранения зарядовых чисел:

$$\sum_{i=1}^n Z = const$$

$$7 + 2 = Z + 1$$

Звідси:

$$Z = 8$$

Отже, у результаті реакції одержали ізотопу оксигену ${}^{17}_8O$.

Відповідь: ${}^{17}_8O$.

2. Знайти дефект мас (в а.о.м.) і енергію зв'язку (в МеВ) ядра атома дейтерію 2_1H .

Дано:



$E_{зв}$ – ?

Δm – ?

Розв'язок

Дефект мас рівний:

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

Тоді можемо записати:

$$E_{зв} = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я}) \cdot 931,5$$

Где Z – порядковий номер елемента (кількість протонів у ядрі атома). Для атома 2_1H $Z = 1$; $A - Z$ – кількість нейтронів в ядрі (для атома 2_1H $A = 2$); $m_{я}$ – маса ядра. Маса ядра 2_1H рівна: $m_{я} = 2,013553$ а.е.м.

Підставимо дані, враховуючи, що маса протона та нейтрона рівні $m_p = 1,00728$ а.о.м; $m_n = 1,00867$ а.о.м.

$$\Delta m = (1 \cdot 1,00728 + (2 - 1) \cdot 1,00867 - 2,013553) = 0,002394 \text{ а.е.м.}$$

$$E_{св} = (1 \cdot 1,00728 + (2 - 1) \cdot 1,00867 - 2,013553) \cdot 931,5 = 2,23 \text{ МэВ}$$

Відповідь: $\Delta m = 0,002394$ а.е.м.; $E_{св} = 2,23$ МэВ.

3. Яку будову має ядро ізотопу золота $^{197}_{79}\text{Au}$? Знайти енергію зв'язку і питому енергію зв'язку цього ядра.

Дано:



Знайти:

$Z - ?$

$N - ?$

$E_{св} - ?$

$E_{пит} - ?$

Розв'язок

Запишемо вираз для визначення енергії зв'язку:

$$E_{св} = \Delta m \cdot 931,4$$

де Δm – дефект мас.

Дефект мас рівний:

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

Маса ядра $^{197}_{79}\text{Au}$ рівна $m_{я} = 3,01605$ а.е.м.

Тоді:

$$E_{св} = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я}) \cdot 931,4$$

Підставимо дані:

$$E_{св} = (1 \cdot 1,00783 + (3 - 1) \cdot 1,00867 - 3,01605) \cdot 931,5 = 8,5 \text{ МэВ}$$

Питому енергію зв'язку, тобто енергію зв'язку, що припадає на один нуклон, знайдемо, поділивши $E_{св}$ на загальну кількість нуклонів A :

$$E_{пит} = \frac{E_{св}}{A}$$

$$E_{пит} = \frac{8,5}{197} = 0,043 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл.}}$$

Відповідь: ядро ізотопу золота $Z=^{197}_{79}\text{Au}$ має 79 протонів и 79 електронів; $N = 118$ нейтронів; $E_{св} = 8,5 \text{ МэВ}$; $E_{пит} = 0,043 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл.}}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Внаслідок захоплення α -частинки ядром ізотопу Азоту $^{14}_7\text{N}$ утворюються невідомий елемент і протон. Запишіть реакцію і визначте невідомий елемент.

2. Знайдіть продукт реакції під час бомбардування ядер ізотопу Магнію $^{24}_{12}\text{Mg}$ α -частинками, якщо в ній виділяються нейтрони.

3. Запишіть схему ядерної реакції і визначте невідомий елемент, що утворюється під час бомбардування ядер ізотопів Алюмінію $^{17}_{13}\text{Al}$ α -частинками, один з продуктів реакції – нейтрон.

4. Визначте масу (в а.о.м. та кг з точністю до цілих) ядер таких елементів: кальцію $^{40}_{20}\text{Ca}$ і літію ^6_3Li .

5. Визначте ядро якого хімічного елемента X утвориться в результаті такої реакції β - розпаду: $^{14}_6\text{C} \rightarrow X + ^0_{-1}\beta$.

6. Який елемент зазнав радіоактивного розпаду, якщо розпад відбувся за такою схемою: $X \rightarrow {}_{20}^{40}\text{Ca} + \alpha$.

7. Визначте у ядрі якого з атомів більше нейтронів і на скільки: ${}_{83}^{211}\text{Bi}$, ${}_{92}^{236}\text{Bi}$.

8. Яке ядро утвориться в результаті α -розпаду полонію ${}_{84}^{212}\text{Po}$?

9. З чого складається нейтральний атом ізотопу ${}^{28}\text{Si}$, з чого складається його ядро? Перерахуйте складові частинки кожної з систем та їхню кількість.

10. Знайти радіуси атомних ядер ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{90}\text{Zr}$, ${}^{238}\text{U}$.

11. Який ізотоп утвориться із радіоактивного ядра ${}_{90}^{230}\text{Th}$ після двох послідовних альфа-розпадів?

12. Який ізотоп утвориться із радіоактивного ядра ${}_{92}^{239}\text{U}$ після трьох послідовних β^- -розпадів?

13. Який тип β -розпаду відбувається згідно запису ${}^7_4\text{Be} + e \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^0_0\nu$?

14. Користуючись таблицею Менделєєва і правилами зміщення, визначити в який елемент перетвориться уран-238 після трьох α - і двох β^- -розпадів.

15. Запишіть β^- -розпад для ${}^{27}_{12}\text{Mg}$.

16. Визначити енергію, що виділиться при утворенні гелію ${}^4_2\text{He}$ масою 1 г із протонів та нейтронів.

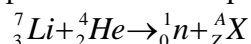
17. Скільки енергії необхідно затратити для того, щоб ядро гелію ${}^4_2\text{He}$ розділити на нуклони?

18. Яку кількість льоду, взятого при -20°C , можна розплавити, якщо використати все тепло, що виділяється при утворенні з протонів та нейтронів 0,2 г гелію? Дефект маси ядра гелію $4,81 \cdot 10^{-29}$ кг, питома теплоємність льоду $3,3 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, швидкість світла у вакуумі $3 \cdot 10^8$ м/с, постійна Авогадро $6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$. Результат подайте в тоннах (т) і округліть до цілого числа.

дейтерію

19. Визначте енергію зв'язку ядра ізотопу дейтерію ${}^2_1\text{H}$.

20. При співударянні частинки з ядром хімічного елемента відбулася ядерна реакція, у результаті якої утворилося дочірнє ядро ${}^A_Z\text{X}$ і відома частинка. Записати рівняння ядерної реакції і визначити дефект маси та енергію зв'язку цього ядра:



21. Знайдіть масу нейтрального атома водню (в а.о.м.).

22. Визначте питому енергію зв'язку (в МеВ) ядра ${}^{12}_6\text{C}$.

23. Знайдіть (в МеВ) найменшу енергію, необхідну для розділення ядра ${}^{12}_6\text{C}$ на три однакові частини.

24. Знайдіть (в МеВ) найменшу енергію, необхідну для видалення протона із ядра азоту ${}^{14}_7\text{N}$.

25. Знайдіть (в МеВ) найменшу енергію, яку необхідно затратити, щоб розділити на окремі нуклони ядро ${}^7_4\text{Be}$.

26. Енергія зв'язку ядра, що складається із трьох протонів і чотирьох нейтронів, рівна 39,3 МеВ. Визначте масу нейтрального атома цього ядра.

27. Визначте дефект маси та енергію зв'язку ядра атома фтору ${}^{19}_9\text{F}$. Маса нейтрального атома фтору $m_F = 18,9984$ а.о.м.

28. Побудуйте графік залежності енергії зв'язку ядер ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{41}_{19}\text{K}$, ${}^{63}_{29}\text{Cu}$, ${}^{96}_{42}\text{Mo}$, ${}^{139}_{57}\text{La}$, ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, що припадає на один нуклон, від загальної кількості нуклонів в ядрі. Яку фізичну інформацію несе цей графік.

29. Яку будову має ядро ізоотопу золота ${}^{197}_{79}\text{Au}$? Знайдіть енергію зв'язку та питому енергію зв'язку цього ядра.

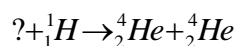
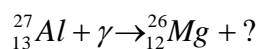
30. Визначте енергію зв'язку ядер ${}^4_2\text{He}$ та ${}^7_4\text{Be}$.

31. Який ізоотоп утворився з радіоактивного ізоотопу ${}^{56}_{25}\text{Mn}$ після кожного з чотирьох β -розпадів?

32. Який ізоотоп утвориться із радіоактивного урану ${}^{235}_{92}\text{U}$ після двох α - та двох β -розпадів?

33. Який ізоотоп утвориться із радіоактивного урану ${}^{232}_{90}\text{Th}$ після двох α - та двох β -розпадів?

34. Дописати ядерні реакції:



35. Який склад мають ізоотопи неону ${}^{20}_{10}\text{Ne}$, ${}^{21}_{10}\text{Ne}$ та ${}^{22}_{10}\text{Ne}$?

36. Обчислити дефект маси для ядра ${}^{59}_{27}\text{Co}$ та дефект маси на один нуклон.

37. Під час реакції взаємодії ${}^{27}_{13}\text{Al}$ з ${}^{24}_2\text{He}$ утворюється ${}^1_1\text{H}$ і ядро деякого ізоотопу. Знайти кількість нейтронів у цьому ізоотопі.

38. Написати рівняння одного α - та двох β -розпадів для ${}^{60}_{27}\text{Co}$.

39. Написати рівняння двох α - та одного β -розпадів для ${}^{238}_{92}\text{U}$.

40. Написати рівняння одного α - та одного β -розпадів для ${}^{225}_{89}\text{Ac}$.

41. Знайти енергію зв'язку та питому енергію зв'язку для ${}^2_1\text{H}$.

42. Знайти енергію зв'язку та питому енергію зв'язку для ${}^7_3\text{Li}$.

43. Як змінюються масове число та номер елемента при викиданні з ядра нейтрона?

44. Знайти енергію зв'язку та питому енергію зв'язку для ${}^{12}_6\text{C}$.

45. Знайти енергію зв'язку та питому енергію зв'язку для ${}^{16}_8\text{O}$.

46. Як змінюються масове число та номер елемента при викиданні з ядра протона?

47. У реакції взаємодії ${}^{27}_{13}\text{Al}$ з ${}^{12}_6\text{C}$ утворюється α -частинка і ядро деякого ізоотопу. Знайти кількість нейтронів у цьому ізоотопі.

48. Яка енергія потрібна для розщеплення ядра ${}^{10}_5\text{B}$ на протони та нейтрони?

49. У реакції взаємодії ${}^7_3\text{Li}$ з ${}^2_1\text{H}$ утворюється нейтрон і ядро деякого ізоотопу. Знайти кількість нейтронів у цьому ізоотопі.

50. У реакції взаємодії ${}^9_4\text{Be}$ з ${}^2_1\text{H}$ утворюється нейтрон і ядро деякого ізоотопу. Знайти кількість протонів у цьому ізоотопі.

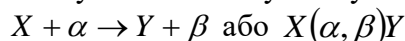
РОЗДІЛ 2. ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ВИХІД ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ

Існують два типи ядерних перетворень:

- ядерні реакції;
- радіоактивність.

Ядерні реакції – це перетворення атомних ядер при їх взаємодії з елементарними частинками (у тому числі і з γ -квантами) або одного з одним.

Символічно ядерні реакції записуються в наступному вигляді:



де X і Y – вихідне і кінцеве ядра;

α і β – частинка, яка бомбардує і частинка що випускається в ядерній реакції.

У будь-якій ядерній реакції виконуються закони збереження електричних зарядів і масових чисел:

Сума зарядів ядер і частинок, які вступають в ядерну реакцію, дорівнює сумі зарядів продуктів реакції (ядер і частинок).

Сума масових чисел ядер і частинок, які вступають в ядерну реакцію, дорівнює сумі масових чисел продуктів реакції (ядер і частинок).

Ядерна реакція характеризується енергією ядерної реакції Q , що дорівнює різниці енергій кінцевої і вихідної пар в реакції:

$$Q = \left(\sum m_i - \sum m_k \right) \cdot c^2$$

$\sum m_i$ – сума мас частинок до реакції; $\sum m_k$ – сума мас частинок після реакції.

Ядерні реакції можуть бути:

а) екзотермічними (з виділенням тепла), при цьому $\sum m_i > \sum m_k$ ($Q > 0$);

б) ендотермічними (з поглинанням тепла), при цьому $\sum m_i < \sum m_k$ ($Q < 0$).

Якщо маси виразити в а.о.м., то енергія ядерної реакції обчислюється в МеВ (мегаелектрон-вольтах) за формулою:

$$Q = 931,15 \left(\sum m_i - \sum m_k \right)$$

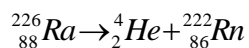
Радіоактивність – явище спонтанного (мимовільного) розпаду ядер, при якому утворюється нове ядро, і випускаються частинки.

Ядро, яке розпадається, називається материнським, виникаюче ядро називається дочірнім.

Природна радіоактивність спостерігається в основному у важких ядер, які розташовуються в періодичній системі Менделєєва за свинцем. Відкрито явище Анрі Беккерелем (франц. фізик) у 1896 році.

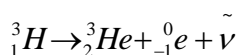
Залежно від того, яка частинка випускається, розрізняють наступні види розпаду:

1. α -розпад – випускання α -частинки, тобто ядер гелію ${}^4_2\text{He}$.

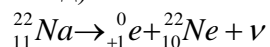


2. β -розпад – випускання:

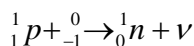
а) електронів – e^- (β^- -розпад)



б) позитронів – e^+ (β^+ -розпад)



в) K -захоплення (електронне захоплення). Перетворення протона на нейтрон йде за схемою

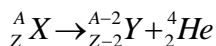


Електронне захоплення полягає в тому, що один з електронів на найближчому до ядра *K-шарі* атома захоплюється ядром. Тут $\bar{\nu}$ і ν – електронні нейтрино і антинейтрино.

3. *Гамма-випромінювання* (γ -випромінювання) – це жорстке електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі $\lambda < 10^{-10}$ м. Має велику проникаючу здатність, оскільки енергія квантів $\epsilon \geq 10^4$ еВ.

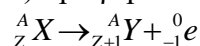
При аналізі результатів радіоактивних розпадів дослідним шляхом були відкриті правила зсуву (правила Фаянса і Содді).

1) при α -розпаді:



α -розпад зменшує масове число на 4, а зарядове на 2, тобто дочірній елемент зміщується на дві клітки вліво в таблиці Д. І. Менделєєва.

2) при β -розпаді:



β -розпад не змінює масового числа, зарядове число збільшує на одиницю, тобто дочірній елемент зміщується на 1 клітку управо.

Радіоактивний розпад зменшує з часом число ядер, що не розпалися. Мимовільний розпад ядер підкоряється закону радіоактивного розпаду:

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

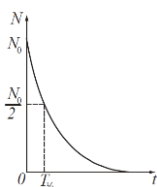
де N_0 – число ядер в даному об'ємі речовини у момент часу $t=0$; N – число ядер в тому ж об'ємі в момент часу t ; λ – стала розпаду.

Стала розпаду λ – це фізична величина, яка чисельно дорівнює частці ядер, які розпадаються за одиницю часу. Стала розпаду визначає швидкість радіоактивного розпаду.

Величина $\tau = \frac{1}{\lambda}$ називається *середньою тривалістю життя* (середній час життя)

радіоактивного ізотопу. Для оцінки стійкості ядер зазвичай використовують не сталу розпаду, а величину, яка називається періодом напіврозпаду.

Період напіврозпаду ($T_{1/2}$) – час, протягом якого первинна кількість



ядер даної радіоактивної речовини розпадається наполовину (рис). Період напіврозпаду може мінятися в дуже широких межах (від доль секунд до тисяч років). Період напіврозпаду і стала розпаду зв'язані наступним співвідношенням:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Закон мимовільного радіоактивного розпаду ґрунтується на двох припущеннях: 1) стала розпаду не залежить від зовнішніх умов; 2) число ядер, що розпадаються за час dt пропорційно вихідній кількості ядер N_0 . Це означає, що закон радіоактивного розпаду є статистичним законом. Статистичні закони можна застосовувати тільки до великої кількості ядер. Закон радіоактивного розпаду не відповідає на питання, яке саме ядро розпадеться, оскільки всі ядра нерозрізні і розпад даного ядра є випадковою подією, що має ту або іншу вірогідність.

Часто буває, що ядра, що виникають в результаті радіоактивних перетворень, у свою чергу виявляються радіоактивними. Нові продукти розпаду також можуть виявитися радіоактивними, тобто виникає цілий ряд радіоактивних перетворень. У природі існують три радіоактивні ряди, родоначальниками яких служить уран (${}^{238}_{92}U$), торій (${}^{232}_{90}Th$) і актиній (${}^{235}_{85}Ac$). Кінцевим продуктом у всіх випадках служать ізомери свинцю.

Основний закон радіоактивного розпаду

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

де N_0 – кількість ядер в початковий момент часу; N – кількість ядер, які не розпалися на момент часу t ; λ – стала радіоактивного розпаду.

Кількість ядер, що розпалися за час t ,

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

Період піврозпаду

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

Середній час життя радіоактивного ядра

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Кількість атомів, що містяться в радіоактивному ізотопі

$$N = \frac{m}{\mu} N_A,$$

де N_A - стала Авогадро; m – маса ізотопу; μ - молярна маса ізотопу.

Активність радіоактивного ізотопу

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

Активність ізотопу в початковий момент часу ($t = 0$)

$$A_0 = \lambda N_0.$$

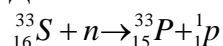
Закон зміни активності ізотопу з часом

$$A = A_0 e^{-\lambda t}.$$

Приклади розв'язання задач

1. Обчислити енергію ядерної реакції ${}_{16}^{33}\text{S} + n \rightarrow {}_{15}^{33}\text{P} + {}_1^1\text{p}$.

Дано:



Знайти:

W – ?

Розв'язок

Для обчислення енергетичного виходу ядерної реакції потрібно знайти різницю мас Δm частинок, що вступають у реакцію, і частинок – продуктів реакції. Знайдемо дефект мас:

$$\Delta m = m_{{}_{16}^{33}\text{S}} + m_n - m_{{}_{15}^{33}\text{P}} - m_{{}_1^1\text{p}}$$

Подставим дані і знайдемо дефект масос в а.о.м., враховуючи, що $m_{{}_{16}^{33}\text{S}} = 32,97146 \text{ а.е.м}$

$$\Delta m = 32,97146 + 1,00867 - 32,97173 - 1,00728 = 0,00112 \text{ а.е.м.}$$

Енергію в МеВ, яка виділяється при ядерній реакції, можна визначити, виходячи із виразу:

$$Q = 931,5 \cdot \Delta m$$

$$Q = 931,5 \cdot 0,00112 = 1,04328 \text{ МэВ} = 1,67 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

Відповідь: $Q = 1,67 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.

2. Обчислити енергію термоядерної реакції ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{H} + {}^1_0\text{n}$.

Дано:

$$m_{1H} = 2,01410 \text{ а.е.м.}$$

$$m_{2H} = 3,01603 \text{ а.е.м.}$$

$$m_{0n} = 1,00867 \text{ а.е.м.}$$

Знайти:

$$Q - ?$$

Розв'язок

Енергія ядерної реакції дорівнює різниці енергії до реакції та після реакції. Енергетичний вихід реакції визначимо формулою:

$$Q = \Delta mc^2$$

де Δm – різниця між масами частинок до і після реакції; $c = 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ – швидкість світла у вакуумі.

Різниця дефектів мас лівої і правої частини реакції рівна:

$$\Delta m = m_{1H} + m_{2H} - m_{3H} - m_{0n}$$

Тоді:

$$Q = (m_{1H} + m_{2H} - m_{3H} - m_{0n})c^2$$

Щоб виразити енергію в МеВ, останній вираз запишемо так:

$$Q = 931,5 \cdot (m_{1H} + m_{2H} - m_{3H} - m_{0n})$$

Тут врахували, що $c^2 \approx 931,5 \frac{M\text{eV}}{\text{а.е.м.}}$.

Підставимо дані:

$$Q = 931,5 \cdot (2,01410 + 2,01410 - 3,01603 - 1,00867) = 3,260 \text{ МeВ} = 5,22 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

Відповідь: $Q = 5,22 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.

3. Активність a препарату деякого ізотопу за час $t = 5$ діб зменшилась на 30%. Знайти період піврозпаду цього препарату.

Дано:

$$t = 5 \text{ діб}$$

$$A = 0,7 A_0$$

Знайти:

$$T - ?$$

Розв'язок

Запишемо закон радіоактивного розпаду через активність:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

A – активність радіоізоотопу в момент часу t , A_0 – активність радіоізоотопу в початковий момент часу $t=0$; λ – стала розпаду.

Запишемо співвідношення між сталою розпаду λ і періодом піврозпаду:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

T – період піврозпаду.

Звідси:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

Тоді:

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

$$A = A_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

$$\frac{A_0}{A} = 2^{\frac{t}{T}}$$

$$\ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = \frac{t}{T} \ln 2$$

$$T = \frac{\ln 2 \cdot t}{\ln\left(\frac{A_0}{A}\right)}$$

Підставимо дані:

$$T = \frac{\ln 2 \cdot 5}{\ln\left(\frac{A_0}{0,7A_0}\right)} = 9,72 \text{ діб}$$

Відповідь: $T = 9,72 \text{ діб}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. При розпаді ${}_{94}\text{Pu}^{239} \rightarrow {}_{92}\text{U}^{235} + {}_2\text{He}^4$ виділяється енергія, більша частина якої складає кінетичну енергію α частинок. $0,09 \text{ MeV}$ несуть γ промені, що випромінюються ядрами урану. Визначте швидкість α частинок. $m_{\text{Pu}} = 239,05122 \text{ а.е.м.}$, $m_{\text{U}} = 235,04299 \text{ а.е.м.}$, $m_{\text{He}} = 4,00260 \text{ а.е.м.}$

2. У ядерній реакції ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{N}$ виділяється енергія $\Delta E = 3,27 \text{ МэВ}$. Визначте масу атома ${}^3_2\text{He}$, несли маса атома ${}^2_1\text{H}$ рівна $3,34361 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

3. Обчислить енергетичний вихід ядерної реакції ${}^{13}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{14}_7\text{N}$.

4. При бомбардуванні α -частинками ядер берилію (${}^9_4\text{Be}$) і ядер бору (${}^{11}_5\text{B}$) утворюються нейтрони. Напишіть ядерні реакції і знайдіть енергію, що виділяється при цих реакціях.

5. Зайдіть (в MeV) енергію, що виділяється при ядерній реакції ${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$.

6. Зайдіть (в MeV) енергію, що виділяється при термоядерній реакції ${}^2_1\text{H} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H}$.

7. Зайдіть (в MeV) енергію, що виділяється при з'єднанні одного протона і двох нейтронів в атомне ядро.

8. Енергія зв'язку ядра атома оксисену ${}^{18}_8\text{O}$ рівна $139,8 \text{ MeV}$, ядра фтору ${}^{19}_9\text{F}$ – $147,8 \text{ MeV}$. Визначте, яку мінімальну енергію необхідно затратити, щоб відірвати один протон від ядра фтору.

9. Виділяється чи поглинається енергія в ядерній реакції ${}^{44}_{20}\text{Ca} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{41}_{19}\text{K} + {}^4_2\text{He}$?

10. Яку мінімальну енергію (в MeV) потрібно затратити, щоб розділити ядро ${}^4_2\text{He}$ на дві однакові частини?

11. Одним із способів отримання потоків нейтронів є так званий ядерний фотоэффект: вибивання з ядерних нейтронів під дією електромагнітних фотонів з дуже великою енергією. Яку мінімальну енергію повинні мати фотони для вибивання нейтрона з дейтрону і берилію-9?

12. Визначте енергію, яка виділяється при з'єднанні одного протона і двох нейтронів в атомне ядро.

13. Визначте енергію ядерної реакції ${}^{33}_{16}\text{S} + n \rightarrow {}^{33}_{15}\text{P} + {}^1_1\text{p}$.
14. З яким ядром потрібно зіштовхнути протон, щоб одержати дві α -частинки? Визначте дефект мас цього ядра і енергію зв'язку.
15. Запишіть у розгорнутому вигляді ядерну реакцію ${}^{19}_9\text{F}(p, \alpha){}^{16}_8\text{O}$. Знайдіть (в МеВ) енергію цієї реакції.
16. Початкова маса радону ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ $m_0 = 0,6$ г. Період піврозпаду $T = 3,82$ доби. Визначити кількість ΔN ядер радону, які розпалися за час $t = 3$ доби. Визначити сталу розпаду радону λ .
17. Кількість ядер радону за час $t = 1$ доба зменшилась на 16,6%. Визначити сталу розпаду радону λ .
18. Стала радіоактивного розпаду ізоотопу ${}_{82}\text{Pb}^{210}$ $\lambda = 10^{-9} \text{ c}^{-1}$. Визначити час t , протягом якого розпадеться 4/5 початкової кількості ядер цього радіоактивного ізоотопу.
19. За час $t_1 = 2$ доби початкова кількість ядер радіоактивного ізоотопу зменшилась в $n = 3,0$ рази. У скільки разів вона зменшиться за час $t_2 = 3$ доби.
20. Початкова маса радіоактивного ізоотопу $m_0 = 0,88$ г. Період піврозпаду $T = 5,5$ с. Визначити масу ізоотопу, що розпався за третю секунду після початку розпаду.
21. Період піврозпаду радіоактивного магнію ${}^{27}_{12}\text{Mg}$ $T = 600$ секунд, початкова маса $m_0 = 0,5$ мг. Визначити початкову активність A_0 магнію і його активність через час $t = 2$ год.
22. За час $t = 24$ год. активність ізоотопу зменшилась від $A_1 = 1,29 \cdot 10^{16}$ Бк до $A_2 = 3,14 \cdot 10^{12}$ Бк. Визначити період піврозпаду T цього ізоотопу.
23. Період піврозпаду торію дорівнює 60,5 хв. Через який час розкладеться 85% торію?
24. В посудині міститься 0,3 г радону. Період піврозпаду дорівнює 3,82 дні. Яка кількість радону (%) залишиться в посудині через 10 днів?
25. В деякій мономолекулярній реакції половина взятої речовини розпадається за 1000 с. Розрахувати час, за який розкладається 0,8 від початкової кількості та 99,9% речовини.
26. Протягом години розкладається 16,7% деякого радіоактивного елемента. Визначити період його піврозпаду.
27. Визначити, у скільки разів початкова кількість ядер радіоактивного ізоотопу зменшиться за 4 роки, якщо за один рік вона зменшиться в 5 разів.
28. Визначити час, за який розпадеться 2/3 від початкової кількості ядер ${}^{219}_{88}\text{Ra}$, якщо його період піврозпаду 10^{-3} с.
29. Визначити період піврозпаду деякого радіоактивного ізоотопу, якщо його активність за дві доби зменшиться в три рази.
30. За який час активність актинію складатиме 35% від початкової, якщо період його піврозпаду дорівнює 36,1 хв.
31. Знайти період піврозпаду радіоактивного ізоотопу, якщо його активність за час $t = 10$ діб зменшилась на 24% порівняно з початковою.
32. За час $t = 1$ добі активність ізоотопу зменшилась від $A_1 = 118$ ГБк до $A_2 = 7,4$ ГБк. Визначити період піврозпаду цього нукліда.
33. На скільки відсотків зменшиться активність ізоотопу іридію за час $t = 15$ діб? Період піврозпаду іридію $T_{1/2} = 75$ діб.
34. За час $t = 8$ діб розпалось $k = \frac{3}{4}$ початкової кількості ядер радіоактивного ізоотопу. Визначити період піврозпаду.

35. Визначити кількість ядер, що розпадаються протягом часу $t_1 = 1$ хв; $t_2 = 5$ діб у радіоактивному ізоотопі фосфору ${}_{15}^{32}P$ масою $m = 1$ мг. Період піврозпаду фосфору $T_{1/2} = 14,3$ доби.

36. З кожного мільйона атомів радіоактивного ізоотопу за $t = 1$ с розпадається 200 атомів. Визначити період піврозпаду.

37. Знайти сталу розпаду радона ${}_{86}Rn^{222}$, якщо відомо, що кількість атомів радону зменшується за час $t = 1$ доби на 18,2%. Період піврозпаду радону $T_{1/2} = 3,8$ доби.

38. Деякий радіоактивний ізоотоп має сталу розпаду $\lambda = 4 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$. Через який час розпадається 75% початкової маси атомів?

39. За один рік початкова кількість радіоактивного ізоотопу зменшилась втричі. У скільки разів вона зменшиться за два роки?

40. Визначити початкову активність радіоактивного препарату магнію Mg^{27} масою $m = 0,2$ мкг, а також його активність через час $t = 6$ год.

41. Визначити енергію ядерної реакції ${}^9_4Be + {}^1_0n \rightarrow {}^{10}_4Be + \gamma$, якщо відомо, що енергія зв'язку ядра берилію 9_4Be $E_{361} = 58,16 \text{ MeV}$, а ядра ${}^{10}_4Be$ $E_{362} = 64,98 \text{ MeV}$.

42. Знайти енергію ядерної реакції ${}^{14}_7N + {}^1_0n \rightarrow {}^{14}_6C + {}^1_1p$ якщо енергія зв'язку ядра азоту ${}^{14}_7N$ $E_{361} = 104,66 \text{ MeV}$, а ядра вуглецю ${}^{14}_6C$ $E_{362} = 105,29 \text{ MeV}$.

43. При ядерній реакції ${}^9_4Be + {}^4_2He \rightarrow {}^{12}_6C + {}^1_0n$ звільняється енергія $Q = 5,70 \text{ MeV}$. Нехтуючи кінетичними енергіями ядер берилію і гелію і приймаючи їх сумарний імпульс таким, що дорівнює нулеві, знайти кінетичні енергії продуктів розпаду.

44. Нехтуючи кінетичними енергіями ядер дейтерію і приймаючи їх сумарний імпульс таким, що дорівнює нулеві, визначити кінетичні енергії та імпульси продуктів реакції ${}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He + {}^1_0n$.

45. Написати термоядерні реакції утворення гелію з тритію й дейтерію і підрахувати, яка кількість енергії в кіловат-годинах виділиться під час утворення $m = 1$ г гелію.

46. Яка маса урану ${}^{235}_{92}U$ витрачається за добу на атомній електростанції потужністю $P = 5000 \text{ кВт}$? ККД станції $\eta = 17\%$. При кожному поділі виділяється енергія 200 MeV .

47. Яку масу води можна нагріти від $T = 273 \text{ K}$ до кипіння, якщо використати все тепло, що виділяється при реакції ${}^7_3Li + {}^1_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^4_2He$ при повному розпаді $m = 1$ г літію?

48. Знайти енергетичну потужність атомної електростанції, що витрачає масу $m = 0,1$ кг урану ${}^{235}_{92}U$ за добу, якщо ККД станції дорівнює $\eta = 16\%$?

49. Стала радіоактивного розпаду ізоотопу ${}^{210}_{82}Pb$ $\lambda = 10^{-9} \text{ c}^{-1}$. Визначити час t , протягом якого розпадеться 4/5 початкової кількості ядер цього радіоактивного ізоотопу.

50. За час $t_1 = 2$ доби початкова кількість ядер радіоактивного ізоотопу зменшилась в $n = 3,0$ рази. У скільки разів вона зменшиться за час $t_2 = 3$ доби.

РОЗДІЛ 3. РУХ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТА МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ

При русі зарядженої частинки в електричному полі на неї діє кулонівська сила:

$$F = qE$$

де q – заряд частинки; E – напруженість електричного поля.

При русі зарядженої частинки в магнітному полі на неї діє сила Лоренца:

$$F_n = q\mathcal{G}B \sin \alpha$$

де B – індукція магнітного поля; \mathcal{G} – швидкість руху частинки; α – кут між векторами $\vec{\mathcal{G}}$ та \vec{B} .

Якщо частинка влітає перпендикулярно до напрямку магнітного поля, то вона буде рухатися по коловій траєкторії, якщо під кутом – то по гвинтовій.

Приклади розв'язання задач

1. Заряджена частинка (альфа частинка), прискорена різницею потенціалів U , влітає в однорідне магнітне поле під кутом $\alpha = 30^\circ$ до напрямку поля і починає рухатися по гвинтовій лінії. Індукція магнітного поля – $B = 10^{-1} \text{ Тл}$, радіус витка гвинтової лінії – $R = 1,5 \text{ см}$, крок гвинтової лінії – h . Знайти U та h .

Дано:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$B = 10^{-1} \text{ Тл}$$

$$R = 1,5 \text{ см} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Знайти:

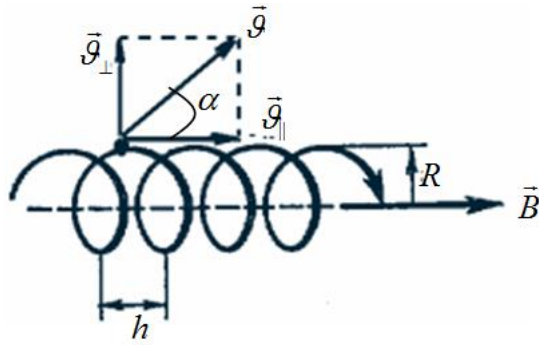
$$U - ?$$

$$h - ?$$

Розв'язок

Якщо заряджена частинка (у нашому випадку альфа частинка) влітає в однорідне магнітне поле під деяким кутом α до напрямків ліній магнітної індукції, вона рухатиметься по гвинтовій траєкторії.

Розкладемо вектор швидкості $\vec{\mathcal{G}}$ на дві складові $\vec{\mathcal{G}}_\perp$ і $\vec{\mathcal{G}}_\parallel$, де $\vec{\mathcal{G}}_\perp \perp \vec{B}$ і $\vec{\mathcal{G}}_\parallel \parallel \vec{B}$, $\vec{\mathcal{G}} = \vec{\mathcal{G}}_\perp + \vec{\mathcal{G}}_\parallel$. Швидкість $\vec{\mathcal{G}}_\parallel$ в магнітному полі не змінюється та забезпечує переміщення частинки вздовж силової лінії. Швидкість $\vec{\mathcal{G}}_\perp$ внаслідок дії сили Лоренца змінюватиметься лише за напрямом ($\vec{F}_n \perp \vec{\mathcal{G}}_\perp$). Таким чином, частинка братиме участь одночасно у двох рухах: рівномірному переміщенні зі швидкістю $\vec{\mathcal{G}}_\parallel$ та рівномірному русі по колу зі швидкістю $\vec{\mathcal{G}}_\perp$.



З малюнка бачимо, що швидкості \vec{g}_\perp і \vec{g}_\parallel можемо записати так:

$$g_\parallel = g \cos \alpha \quad (1)$$

$$g_\perp = g \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = g \sin \alpha \quad (2)$$

Період обертання частинки пов'язаний з перпендикулярною складовою співвідношенням:

$$T = \frac{2\pi R}{g_\perp} \quad (3)$$

Він залежить ні від модуля швидкості \vec{g} , ні від її напрямку, що визначається кутом α .

За час, рівний періоду звернення T , частинка пройде у напрямі магнітного поля відстань, рівну кроку гвинтової лінії, тобто:

$$h = T g_\parallel \quad (4)$$

З двох останніх виразів можемо записати:

$$h = \frac{2\pi R}{g_\perp} \cdot g_\parallel$$

Підставимо (1) і (2) в останній вираз:

$$h = \frac{2\pi R}{g \sin \alpha} \cdot g \cos \alpha = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha$$

$$h = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha \quad (5)$$

де R – радіус траєкторії.

Сила Лоренца надає α -частинці доцентрове прискорення:

$$a_\perp = \frac{g_\perp^2}{R}$$

Згідно другого закону Ньютона можемо записати:

$$F_n = m a_\perp = m \frac{g_\perp^2}{R}$$

З іншої сторони сила Лоренца рівна:

$$F_n = qB g_\perp \sin \beta$$

де q – заряд частинки; β – кут між векторами \vec{g} та \vec{B} . У нашому випадку $\beta = \frac{\pi}{2}$, оскільки частинка рухається по коловій траєкторії. Врахувавши, що $\sin \frac{\pi}{2} = 1$, з двох останніх виразів можемо записати:

$$qB g_\perp = m \frac{g_\perp^2}{R}$$

Звідси:

$$g_{\perp} = \frac{qBR}{m}$$

Підставимо останній вираз у (3):

$$T = \frac{2\pi R}{\frac{qBR}{m}} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Підставимо останній вираз у (4):

$$h = \frac{2\pi m}{qB} \cdot g_{\parallel}$$

Звідси:

$$g_{\parallel} = \frac{h}{\frac{2\pi m}{qB}} = \frac{hqB}{2\pi m}$$

Тоді результуюча швидкість частинки дорівнюватиме:

$$g = \sqrt{g_{\parallel}^2 + g_{\perp}^2} = \sqrt{\left(\frac{hqB}{2\pi m}\right)^2 + \left(\frac{qBR}{m}\right)^2} = \frac{qB}{m} \sqrt{\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 + R^2}$$

Пройшовши прискорюючу різницю потенціалів U , частинка набуде кінетичну енергію, яка рівна:

$$E_{\kappa} = \frac{m g^2}{2} = \frac{m \left(\frac{qB}{m} \sqrt{\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 + R^2} \right)^2}{2} = \frac{q^2 B^2}{2m} \left(\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 + R^2 \right)$$

де m – маса частинки.

З іншої сторони, виходячи із закону збереження енергії, можемо записати $qU = E_{\kappa}$:

$$qU = \frac{q^2 B^2}{2m} \left(\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 + R^2 \right)$$

Звідси:

$$U = \frac{qB^2}{2m} \left(\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 + R^2 \right)$$

Підставимо (5) в останній вираз:

$$U = \frac{qB^2}{2m} \left(\left(\frac{2\pi R \operatorname{ctg} \alpha}{2\pi}\right)^2 + R^2 \right) = \frac{qB^2}{2m} \left((R \operatorname{ctg} \alpha)^2 + R^2 \right) = \frac{qB^2 R^2}{2m} (\operatorname{ctg}^2 \alpha + 1) =$$

$$= \frac{qB^2 R^2}{2m} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} + 1 \right) = \frac{qB^2 R^2}{2m} \left(\frac{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \right) = \frac{qB^2 R^2}{2m \sin^2 \alpha}$$

$$U = \frac{qB^2 R^2}{2m \sin^2 \alpha} \quad (6)$$

Підставимо дані в (6) і (7), враховуючи, що для α -частинки $m = 6,645 \cdot 10^{-27}$ кг, $q = 3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл:

$$h = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot \operatorname{ctg} 30^\circ = 0,163 \text{ м}$$

$$U = \frac{3,2 \cdot 10^{-19} \cdot (10^{-1})^2 \cdot (1,5 \cdot 10^{-2})^2}{2 \cdot 6,645 \cdot 10^{-27} \cdot \sin^2 30^\circ} = 217 \text{ В}$$

Відповідь: $h = 0,163 \text{ м}$; $U = 217 \text{ В}$.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Електрон, прискорений різницею потенціалів 6 кВ, влітає в однорідне магнітне поле під кутом 30° до напрямку поля і рухається по гвинтовій траєкторії. Індукція магнітного поля 13 мТл. Знайдіть радіус R і крок h гвинтової траєкторії.

2. Магнітне поле, індукція якого 0,5 мТл, спрямоване перпендикулярно до електричного поля, напруженість 1 кВ/м. Пучок електронів влітає в електромагнітне поле, при чому швидкість електронів перпендикулярна площині, в якій лежать вектори \vec{E} та \vec{B} . Знайти швидкість електронів, якщо при одночасній дії обох полів пучок електронів не відхиляється від початкового напрямку. Яким буде радіус R траєкторії руху електронів при умові включення тільки одного магнітного поля?

3. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 0,3 мТл по гвинтовій лінії. Визначте швидкість електрона, якщо радіус гвинтової лінії 3 см, а крок 9 см.

4. Заряджена частинка, прискорена різницею потенціалів 2 кВ, рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 15,1 мТл по колу радіусом 1 см. Визначити відношення заряду частинок до її маси і швидкість частинки.

5. В однорідному магнітному полі з індукцією 2 Тл рухається протон по гвинтовій лінії радіусом 10 см і кроком 60 см. Визначити кінетичну енергію протона.

6. Електрон в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 2 мТл рухається по радіусу кругової орбіти 15 см. Визначити магнітний момент кругового струму.

7. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл по колу. Визначити максимальну швидкість обертання електрона.

8. Визначте період обертання і швидкість електрона при його русі по гвинтовій лінії в однорідному магнітному полі з індукцією 9 мТл. Радіус гвинтової лінії 0,8 см і її крок 7,5 см.

9. Електрон, прискорений різницею потенціалів 3 кВ, влітає в однорідне магнітне поле соленоїда під кутом 30° до його осі. Число ампер-витків соленоїда рівне 5000. Довжина соленоїда 25 см. Знайти крок гвинтової траєкторії електрона в магнітному полі соленоїда.

10. Перпендикулярно магнітному полю $\left(H = 1 \frac{\kappa A}{m} \right)$ створене електричне поле $\left(E = 200 \frac{B}{cm} \right)$. Перпендикулярно полям рухається по прямій лінії заряджена частинка.

Знайти швидкість частинки.

11. Електрон, прискорений різницею потенціалів 1000 В, влітає в однорідне магнітне поле, перпендикулярно спрямоване його руху. Індукція магнітного поля рівна $1,19 \cdot 10^{-3}$ Тл. Знайти: 1) радіус кривизни траєкторії електрона; 2) період обертання його по колу; 3) момент імпульсу руху.

12. Електрон рухається в однорідному магнітному полі, індукція якого рівна 50 Гс, по гвинтовій лінії радіусом 2 см і кроком «гвинта» 5 см. Визначити енергію електрона і кут, який складає вектор швидкості електрона з вектором магнітної індукції поля в початковий момент часу.

13. Знайти швидкість і енергію α частинок, що вилітають з циклотрона, якщо перед виходом вони рухаються по колу радіусом 50 см. Індукція магнітного поля 1,7 Тл.

14. В однорідному магнітному полі з індукцією 2 Тл рухається протон по гвинтовій лінії радіусом 10 см і кроком 60 см. Визначити кінетичну енергію протона.

15. Яка частота прискорюючого поля між дуантами циклотрона при прискоренні в ньому дейтронів, якщо індукція магнітного поля рівна 1 Тл.

16. Електрон, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів $U=1$ В, влетів у однорідне магнітне поле під кутом $\alpha = 30^\circ$. Визначити індукцію магнітного поля, якщо воно діє на електрон із силою $F = 3 \cdot 10^{-18}$ Н.

17. Електрон рухається по колу в однорідному магнітному полі напруженістю $H = 2,5 \cdot 10^4$ А/м. Визначити період T обертання електрона.

18. Електрон влетів у однорідне магнітне поле ($B = 200$ мТл) перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначити силу еквівалентного кругового струму $I_{\text{екв}}$, створеного рухом електрона магнітному полі.

19. Знайти кінетичну енергію протона, що рухається дугою кола радіусом 60 см у магнітному полі з індукцією 1 Тл.

20. Альфа-частка пройшла прискорюючу різницю потенціалів $U=300$ і, потрапивши в однорідне магнітне поле, стала рухатися по гвинтовій лінії радіусом $R=1$ см і кроком $h=4$ см. Визначити магнітну індукцію поля.

21. Визначити імпульс протона, що рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 0,015 Тл по колу радіусом 10 см.

22. Заряджена частинка рухається в однорідному магнітному полі по гвинтовій лінії. Вектор швидкості частинки спрямований під кутом 80° до ліній магнітної індукції. У скільки разів крок гвинтової лінії більший за її радіус?

23. Електрон, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів $U= 1,2$ кВ, потрапив у схрещенні під прямим кутом однорідні магнітне та електричне поля і почав рухатися

прямолинійно. Визначити напруженість E електричного поля, якщо магнітна індукція поля дорівнює 6 мТл .

24. Електрон в однорідному магнітному полі рухається гвинтовою лінією радіусом 5 см і кроком 29 см . Визначити швидкість електрона, якщо магнітна індукція дорівнює 10^{-4} Тл .

25. Магнітне ($B=2 \text{ мТл}$) та електричне ($E=1,6 \text{ кВ/м}$) поля співнаправлені. Перпендикулярно до векторів \vec{B} і \vec{E} влітає електрон зі швидкістю $0,8 \text{ Мм/с}$. Визначити прискорення електрона.

26. Гвинтова лінія, якою рухається електрон в однорідному магнітному полі, має діаметр 8 см і крок 20 см . Індукція поля 5 мТл . Визначити швидкість електрона.

27. У однорідному магнітному полі з індукцією $B = 2 \text{ Тл}$ рухається α -частинка. Траєкторія її руху є гвинтовою лінією з радіусом $R = 1 \text{ см}$ і кроком $h = 6 \text{ см}$. Визначити кінетичну енергію α -частинки.

28. Іон, що несе один елементарний заряд, рухається в однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,015 \text{ Тл}$ по колу радіусом $R=10 \text{ см}$. Визначити імпульс іона.

29. Електрон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до силових ліній. Швидкість електрона $2 \cdot 10^7 \text{ м/с}$, індукція магнітного поля дорівнює $4 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$. Чому дорівнює тангенціальне та нормальне прискорення електрона в магнітному полі.

30. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 4 мТл . Знайти період обертання електрона, якщо його швидкість та вектор індукції утворюють кут 90° .

ДОДАТКИ

Таблиця 1.

Швидкість світла в вакуумі	$3 \cdot 10^8 \frac{m}{c}$
Постійна Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$
Постійна Планка	$h = 6,62 \cdot 10^{-34} Дж \cdot c$
Постійна Рідберга	$R = 1,097 \cdot 10^7 м^{-1}$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{м}$
Борівський радіус	$r = 0,529 \cdot 10^{-10} м$
Маса спокою електрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} кг$
Заряд електрона	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} Кл$
Маса спокою протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} кг$
Маса спокою нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} кг$

Таблиця 2.

Атомні маси деяких атомних ядер, а.о.м.

Ізотоп	Маса	Ізотоп	Маса	Ізотоп	Маса
1_1H	1,00814	9_4Be	9,01505	${}^{30}_{14}Si$	29,98325
2_1H	2,01474	${}^{10}_5Be$	10,01612	${}^{40}_{20}Ca$	39,97542
3_1H	3,01700	${}^{12}_6C$	12,00380	${}^{48}_{20}Ca$	47,95236
3_2He	3,01699	${}^{13}_7N$	13,00987	${}^{56}_{27}Co$	55,95769
4_2He	4,00388	${}^{14}_7N$	14,00752	${}^{63}_{29}Cu$	62,94962
6_3Li	6,01703	${}^{17}_8O$	17,00453	${}^{113}_{48}Cd$	112,94206
7_3Li	7,01823	${}^{23}_{12}Mg$	23,00145	${}^{200}_{80}Hg$	200,02800
7_4Be	7,01916	${}^{24}_{12}Mg$	23,99267	${}^{235}_{92}U$	235,11750
8_4Be	8,00785	${}^{27}_{13}Al$	26,99010	${}^{238}_{92}U$	238,12376

Періоди піврозпаду деяких ізотопів

${}_{12}^{23}Mg$	10 хв	${}_{58}^{144}Ce$	285 діб
${}_{86}^{222}Rn$	3,8 доби	${}_{27}^{60}Co$	5,3 року
${}_{53}^{131}I$	8 діб	${}_{38}^{90}Sr$	28 років
${}_{89}^{225}Ac$	10 діб	${}_{88}^{226}Ra$	1590 років
${}_{15}^{32}P$	14,3 доби	${}_{90}^{229}Th$	7000 років
${}_{84}^{210}Po$	138 діб	${}_{92}^{235}U$	$7,1 \cdot 10^8$ років
${}_{20}^{45}Ca$	164 доби	${}_{92}^{238}U$	$4,5 \cdot 10^9$ років

Похідні від основних констант

Маса електрона

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

Маса протона

$$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007 \text{ а.о.м.}$$

Маса нейтрона

$$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008 \text{ а.о.м.}$$

$$1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Атомна одиниця маси в енергетичних одиницях

$$1 \text{ а.о.м.} \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV}$$

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

Коефіцієнт взаємозв'язку маси та енергії:

$$c^2 = \frac{E}{m} = 8,9874 \cdot 10^{16} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{а.о.м.}}$$

Атомна одиниця маси в енергетичних одиницях

$$1 \text{ а.о.м.} \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV}$$

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

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

Енергія спокою електрона:

$$E_{0e} = 8,187 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,511 \text{ MeV}$$

Енергія спокою протона:

$$E_{0p} = 1,503 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 938,26 \text{ MeV}$$

Енергія спокою нейтрона:

$$E_{0n} = 1,505 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 939,55 \text{ MeV}$$

Питомий заряд електрона:

$$\frac{e}{m_e} = 1,759 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Булавін Л. А., Тартаковський В. К. Ядерна фізика. Підручник, 2-е видання, перероблене і доповнене. К : Знання, 2005. 439 с.
2. Давидюк Г. Є., Мирончук Г. Л. Радіація і людина : навч. посіб. Луцьк : ВежаДрук, 2018. 309 с.
3. Каденко І. М., Плюйко В. А. Фізика атомного ядра та частинок : підручник. 2-ге вид., переробл. і доповн. Електронна версія. К : 2019, 467 с.
4. Методичні вказівки до самостійної роботи з курсу «Радіохімія та радіоекологія»: Методична розробка / Укладач Л.Я. Мідак. Івано-Франківськ : Прикарп. нац. ун-т ім. В.Стефаника, 2019. 28 с.
5. Мирончук Г. Л., Коровицький А. М., Пясецький М. Фізика ядра і елементарних частинок = Nuclear Physics And Elementary Particles : методичні рекомендації до лабораторних робіт. Луцьк : Вежа-Друк, 2017. 75 с.
6. Мідак Л.Я., Кравець І.В. Основи радіохімії. Івано-Франківськ: пп Голіней, 2013. 160 с.
7. Плекан Р.М. Атомна і ядерна фізика: методичні рекомендації з курсу «Загальна фізика» (для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»). Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2019. 42 с.
8. Фізика атомного ядра та частинок [Текст] : підруч. для студентів фіз. ф-тів ун-тів / І.М. Каденко, В.А. Плюйко ; Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ : Київський університет, 2008. 414 с.

Навчально-методичне видання

Мирончук Галина Леонідівна
Кевшин Андрій Григорович
Галян Володимир Володимирович

Фізика ядра і елементарних частинок

Задачі

Друкується в авторській редакції