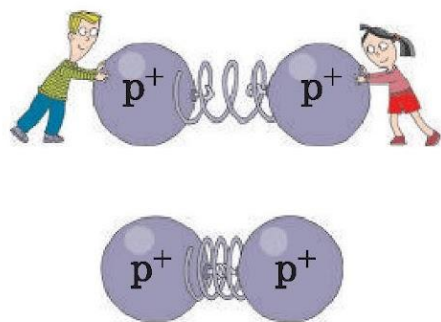


§ 39. ПРОТОННО-НЕЙТРОННА МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА. ЯДЕРНІ СИЛИ. ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ



Уявіть собі перші теплі весняні дні та велику перерву в школі. Ле́дь пролунав дзвоник — і першокласники миттю розбігаються шкільним подвір'ям. Здається, немає сили, що може утримати їх разом. На перший погляд, протони в ядрі мають поводитися подібно до цих школярів — «розбігтися» в різні боки під впливом електростатичних сил відштовхування, а саме ядро має миттєво розвалитися. Але ж цього не відбувається! Логічно припустити, що є якісь інші сили, які утримують протони разом. Що це за сили?

1

Згадуємо будову ядра атома

Атомне ядро складається із частинок двох видів: **протонів**, які мають позитивний електричний заряд, і **нейтронів**, які не мають заряду. Маса протона приблизно дорівнює масі нейтрона і в 1800 разів більша за масу електрона.

Протони і нейтрони, що входять до складу ядра атома, називають **нуклонами** (від латин. *nucleus* — ядро).

Сумарну кількість протонів і нейтронів в атомі називають **нуклонним (масовим) числом** і позначають символом A .

Атом є електрично нейтральним: у нейтральному атомі сумарний заряд протонів у ядрі дорівнює сумарному заряду електронів. Заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона (елементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), тому в нейтральному атомі кількість протонів дорівнює кількості електронів.

Кількість протонів у ядрі називають **зарядовим (протонним) числом** і позначають символом Z . Порядковий номер елемента в Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва відповідає кількості протонів у ядрі, тобто зарядовому числу.

Знаючи зарядове (Z) і масове (A) числа ядра атома, можна визначити кількість нейтронів (N) у цьому ядрі: $N = A - Z$.

Вид атомів, який характеризується певним значенням зарядового числа та певним значенням масового числа, називають **нуклідом** (рис. 39.1).

Якщо різні нукліди мають однакове зарядове число, то їхні хімічні властивості

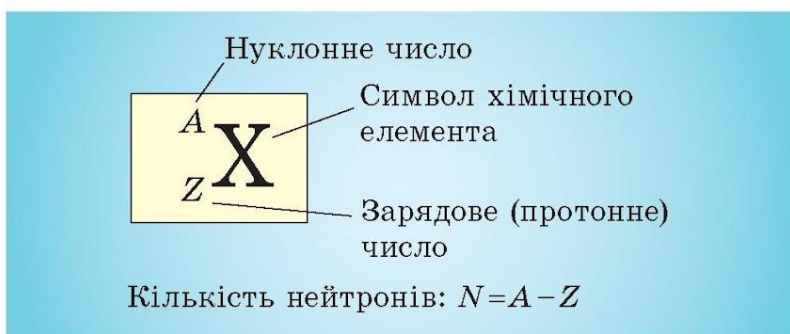


Рис. 39.1. Позначення нукліда хімічного елемента

Історія вивчення атомного ядра

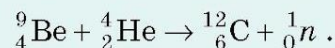
1911 р. Англійський фізик *Ернест Резерфорд* (1871–1937) у досліді з розсіювання α -частинок ядрами Аурому відкрив ядро атома.

1913 р. Англійський фізик *Генрі Мозлі* (1887–1915) виміряв електричні заряди атомних ядер.

1919 р. *Е. Резерфорд*, опромінюючи α -частинками азот, відкрив **протон** 1_1p — ядро атома Гідрогену.

1920 р. *Е. Резерфорд*, опромінюючи α -частинками низку елементів, виявив, що з їх ядер α -частинки теж вибивають протони. Учений дійшов висновку, що ядра атомів усіх елементів містять протони, і припустив можливість існування в атомному ядрі нейтральної частинки з масою, що приблизно дорівнює масі протона.

1932 р. Англійський фізик *Джеймс Чедвік* (1891–1974) під час дослідів з опромінення α -частинками берилію відкрив **нейтрон** 1_0n :



1932 р. Радянський фізик *Дмитро Дмитрович Іваненко* (1904–1994) і німецький фізик *Вернер Карл Гейзенберг* (1901–1976) висунули гіпотезу щодо **протонно-нейтронної будови ядра**. (Д. Д. Іваненко народився в Полтаві, працював у Харкові, Києві, Ленінграді (зараз Санкт-Петербург), Москві.)

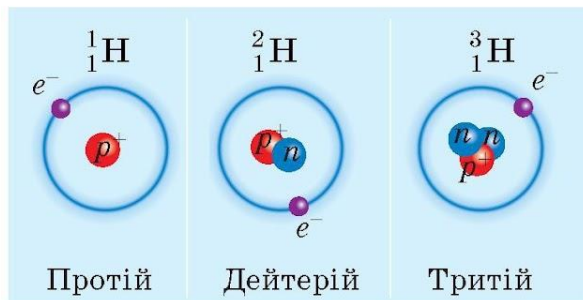


Рис. 39.2. Ізотопи Гідрогену, які існують у природі; e^- — електрон, p^+ — протон, n — нейтрон

є однаковими — нукліди належать одному хімічному елементу.

Різновиди атомів того самого хімічного елемента, ядра яких містять однакове число протонів, але різну кількість нейтронів, називають **ізотопами** («однакові за місцем»).

Кожний хімічний елемент має декілька ізоотопів (рис. 39.2).

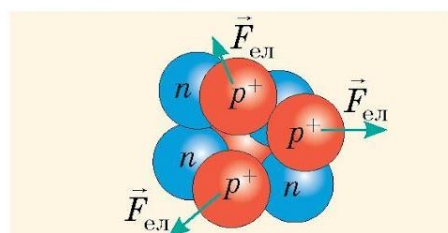
? Скільки протонів і нейтронів містять ядра Урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ і ${}^{235}_{92}\text{U}$? Чи можна їх назвати ізотопами?

2 Якими є основні властивості ядерних сил

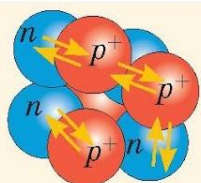
Ядра є дуже стійкими. Але яким чином у складі одного ядра і на дуже близькій відстані один від одного утримуються протони, адже однойменно заряджені частинки відштовхуються, нейтрони не мають заряду, а сили гравітаційного притягання у 10^{36} разів менші від сил електростатичного відштовхування?

З'ясовано, що нуклони притягуються один до одного завдяки **сильній взаємодії**, яка набагато сильніша за електромагнітну взаємодію. Зазначимо, що сильна взаємодія — це фундаментальна взаємодія, яка виявляється не лише як взаємодія нуклонів.

Сили, які діють між протонами й нейтронами в ядрі та забезпечують існування атомних ядер, називають **ядерними силами** (рис. 39.3).



Кулонівські (електростатичні) сили відштовхування намагаються «зруйнувати» ядро



Ядерні сили утримують нуклони всередині ядра

Рис. 39.3. Сили взаємодії між нуклонами всередині ядра

Основні властивості ядерних сил:

1) це **найпотужніші сили**, які існують у природі, — вони у 100–1000 разів більші за електростатичні сили відштовхування двох протонів, розташованих на близькій відстані ($\sim 10^{-15}$ м);

2) є **тільки силами притягання**;

3) є **близькодійними**: вимірювання показали, що ядерні сили виявляються лише на відстанях, які приблизно дорівнюють розміру нуклона ($\sim 10^{-15}$ м);

4) **не залежать від заряду**: на однаковій відстані сили, що діють між двома протонами, між двома нейтронами або між протоном і нейтроном, є однаковими;

5) **мають властивість насичення**: нуклон виявляється здатним до ядерної взаємодії одночасно лише з невеликою кількістю розташованих поряд нуклонів.

3 Енергія зв'язку атомного ядра

Ядерні сили набагато сильніші за кулонівські, тому, щоб «розділити» ядро на окремі нуклони, необхідно виконати роботу, тобто витратити певну енергію.

Енергію, необхідну для повного розщеплення ядра на окремі нуклони, називають **енергією зв'язку атомного ядра** ($E_{\text{зв}}$).

За законом збереження енергії така сама енергія повинна виділитися під час утворення ядра. А як розрахувати цю енергію? Відповідь дала теорія відносності: енергія і маса пов'язані формулою Ейнштейна:

$$E = mc^2.$$

Ретельні вимірювання довели, що *маса будь-якого ядра менша від суми мас нуклонів, із яких це ядро складається*:

$$m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n,$$

де $m_{\text{я}}$ — маса ядра; Zm_p — маса протонів у ядрі; Nm_n — маса нейтронів у ядрі.

Різницю маси нуклонів, з яких складається ядро, і маси ядра називають **дефектом мас**:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_{\text{я}}$$

Оскільки під час утворення ядра маса системи зменшується, то енергію, яка виділиться під час утворення ядра, а отже, й енергію зв'язку можна визначити за формулою:

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2 = [(Zm_p + Nm_n) - m_{\text{я}}] \cdot c^2$$

4 Питома енергія зв'язку атомного ядра

Для того щоб розуміти, чому одні ядерні реакції відбуваються з поглинанням енергії, а під час інших енергія, навпаки, виділяється, необхідно знати про *питому енергію зв'язку*.

Питома енергія зв'язку f — це фізична величина, яка характеризує ядро певного нукліда й чисельно дорівнює енергії зв'язку, що припадає на один нуклон ядра:

$$f = \frac{E_{\text{зв}}}{A},$$

де $E_{\text{зв}}$ — енергія зв'язку; A — кількість нуклонів у ядрі (масове число).

Зверніть увагу!

У ядерній фізиці незручно використовувати одиниці СІ (маси та енергії частинок є дуже малими), тому зазвичай масу частинок подають в атомних одиницях маси ($1 \text{ а. о. м.} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$), а енергію — у мегаелектронвольтах ($1 \text{ MeV} = 1,60222 \times 10^{-13} \text{ Дж}$). Нескладно довести: якщо $\Delta m = 1 \text{ а. о. м.}$, то $E_{\text{зв}} = 931,5 \text{ MeV}$, отже:

$$E_{\text{зв}} = \Delta m \cdot k,$$

$$\text{де } k = 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{а.о.м.}}$$

• Якщо в задачі дано масу нейтрального атома (а не масу ядра), то, щоб врахувати масу електронів, дефект мас обчислюють за формулою:

$$\Delta m = (Zm_{\text{H}} + Nm_n) - m_{\text{ат}},$$

де $m_{\text{ат}}$ — маса нейтрального атома, m_{H} — маса атома Гідрогену ${}^1_1\text{H}$; m_n — маса нейтрона.

? Доведіть останню рівність, врахувавши, що кількість електронів у нейтральному атомі дорівнює кількості протонів у його ядрі, а атом Гідрогену ${}^1_1\text{H}$ складається з одного протона й одного електрона.

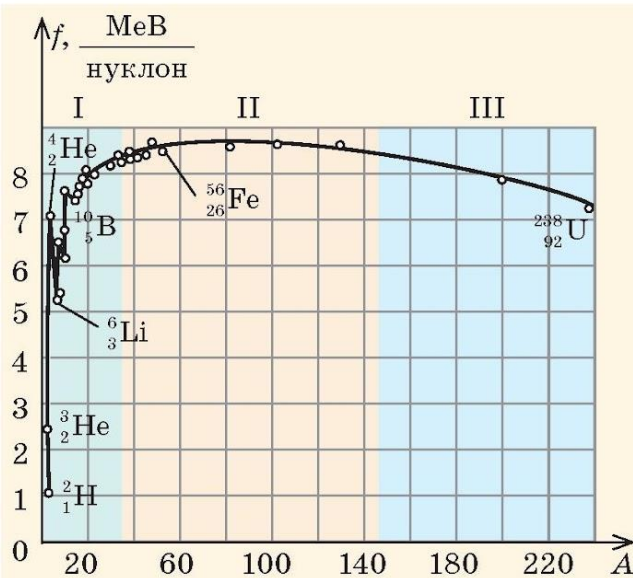


Рис. 39.4. Графік залежності питомої енергії зв'язку ядер різних нуклідів від кількості нуклонів у ядрі: $f(A)$

На графіку залежності $f(A)$ можна виділити три ділянки.

- Ділянка I (легкі ядра) — крива залежності поступово піднімається, тобто питома енергія зв'язку збільшується; це означає, що в разі синтезу (об'єднання) легких ядер у більш важкі буде виділятися енергія.
- Ділянка II (ядра елементів середньої частини Періодичної системи хімічних елементів) майже рівна, на цій ділянці крива досягає слабого максимуму, який означає, що елементи цієї частини найбільш стійкі.
- Ділянка III (важкі ядра) — питома енергія зв'язку плавно зменшується, тому ядра стають менш стійкими і під час поділу цих ядер буде вивільнятися енергія.

На рис. 39.4 подано графік залежності питомої енергії зв'язку ядер різних нуклідів від кількості нуклонів у ядрі — графік залежності $f(A)$. Аналіз графіка дозволяє знайти способи, якими можна отримати ядерну енергію: перший спосіб полягає в поділі важкого ядра (реакція поділу), другий — в об'єднанні легких ядер в одне (реакція синтезу). Унаслідок і реакції поділу, і реакції синтезу утворюються ядра з більшою питомою енергією зв'язку: на один нуклон припадає більший дефект мас — маса, що залишилась, перетворюється на енергію.

5

Учимося розв'язувати задачі

Задача. Обчисліть питому енергію зв'язку ядра Гелію (${}^4_2\text{He}$). Необхідні дані знайдіть у таблиці «Маса деяких нуклідів» (Додаток 1).

Аналіз фізичної проблеми. У ядрі Гелію ${}^4_2\text{He}$ 2 протони ($Z=2$) і 4 нуклони ($A=4$). Використавши числові значення мас атома Гідрогену, нейтрона та атома Гелію, одержимо дефект мас в атомних одиницях маси та знайдемо питому енергію зв'язку.

Дано:

$$m_{\text{He}} = 4,00260 \text{ а. о. м.}$$

$$m_{\text{H}} = 1,00783 \text{ а. о. м.}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ а. о. м.}$$

$$k = 931,5 \frac{\text{MeB}}{\text{а. о. м.}}$$

$$Z = 2$$

$$A = 4$$

$$f = ?$$

Пошук математичної моделі, розв'язання.

$$\text{За означенням питомої енергії зв'язку: } f = \frac{E_{\text{зв}}}{A}.$$

$$\text{Енергію зв'язку визначимо за дефектом мас } \Delta m: E_{\text{зв}} = \Delta m k, \text{ де } \Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{He}}.$$

Знайдемо значення шуканої величини:

$$\Delta m = 2 \cdot 1,00783 \text{ а. о. м.} + 2 \cdot 1,00866 \text{ а. о. м.} - 4,00260 \text{ а. о. м.} = 0,03038 \text{ а. о. м.}$$

$$E_{\text{зв}} = 0,03037 \text{ а. о. м.} \cdot 931,5 \frac{\text{MeB}}{\text{а. о. м.}} \approx 28,3 \text{ MeB};$$

$$f \approx \frac{28,3 \text{ MeB}}{4 \text{ нуклона}} \approx 7,07 \frac{\text{MeB}}{\text{нуклон}}.$$

Відповідь: $f \approx 7,07 \text{ MeB / нуклон.}$



Підбиваємо підсумки

- Ядра атомів складаються з нуклонів — протонів і нейтронів. Кількість протонів (Z) у ядрі атома даного елемента дорівнює порядковому номеру цього елемента в Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва, кількість нуклонів (A) дорівнює масовому числу.
- Різновиди хімічного елемента, атоми яких містять у своїх ядрах однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів, називають ізотопами даного хімічного елемента.
- У ядрі нуклони утримуються разом завдяки дії ядерних сил. Ядерні сили є близькодійними — на відстанях, більших за розмір нуклона, вони не виявляються.
- Маса ядра атома є меншою, ніж сума мас нуклонів у його складі. Зазначену різницю називають дефектом мас Δm . Дефект мас визначає енергію зв'язку: $E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$.
- Вивільнення ядерної енергії можливе, наприклад, унаслідок злиття (синтезу) легких ядер і поділу важких ядер.



Контрольні запитання

1. Із яких частинок складається атомне ядро?
2. Як визначити кількість протонів і нейтронів у ядрі? Наведіть приклад.
3. Дайте означення нукліда.
4. Які нукліди називають ізотопами? Наведіть приклади.
5. Який тип взаємодії забезпечує утримання нуклонів у ядрі атома?
6. Дайте означення ядерних сил, назвіть їхні властивості.
7. Що таке дефект мас і як його визначити?
8. Дайте означення енергії зв'язку. Як її обчислити?
9. Охарактеризуйте питому енергію зв'язку як фізичну величину.
10. Чому під час злиття легких ядер і під час поділу важких вивільняється енергія?



Вправа № 39

1. Визначте, скільки протонів і скільки нейтронів міститься в ядрі Флуору ${}^{19}_9\text{F}$; ядрі Телуру ${}^{127}_{52}\text{Te}$; ядрі Меркурію ${}^{201}_{80}\text{Hg}$.
2. Для ядра ізотопу якого елемента енергія зв'язку дорівнює нулю?
3. За графіком залежності питомої енергії зв'язку від масового числа (див. рис. 39.4) визначте, виділенням чи поглинанням енергії супроводжується розпад ядра, яке складається з 210 нуклонів.
4. Знайдіть дефект мас, енергію зв'язку та питому енергію зв'язку ядра Нітрогену ${}^{14}_7\text{N}$.
5. Якою є питома енергія зв'язку ядра ізотопу Оксигену-17?
6. У результаті розпаду ядра Урану-235 утворились ядра Барію-142 і Криптон-91. Скільки енергії при цьому виділилося? Питома енергія зв'язку ядра Урану-235 — 7,59 МеВ/нуклон, ядра Барію-142 — 8,38 МеВ/нуклон, ядра Криптон-91 — 8,55 МеВ/нуклон.
7. Наведений у пункті 1 § 39 перелік імен учених, які зробили значний внесок у дослідження будови атомного ядра, можна продовжити: *Ірен Жоліо-Кюрі, Ліза Майтнер, Отто Ган, Френсіс Вільям Астон* та ін. За розробку оболонкової моделі ядра лауреаткою Нобелівської премії з фізики (1963 р.) стала *Марія Геннерт-Майер*. Підготуйте коротке повідомлення (1–2 хв) про відкриття одного з цих дослідників чи дослідниць.

Джерело: Фізика. Підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти
за ред. Бар'яхтара В.Г., Довгого С.О. – Харків, «Ранок», 2019р