

§ 54. ЯДЕРНІ СИЛИ ТА ЇХНІ ОСОБЛИВОСТІ



Уявіть собі перші теплі весняні дні та велику перерву в школі. Ледь пролунав дзвоник — і першокласники миттю розбігаються по шкільному подвір'ю. Здається, немає сили, що може утримати їх разом. На перший погляд, однойменно заряджені протони в ядрі мають поводитися подібно до цих школярів — розбігтися в різні боки під впливом електростатичних сил відштовхування, а саме ядро має миттєво розвалитися.

Оскільки цього не відбувається, логічно припустити, що є якісь інші сили, які утримують нуклони разом. Що це за сили?

**Загальна характеристика ядерних сил**

Ядерні сили є найбільш потужними серед чотирьох відомих на сьогодні взаємодій: гравітаційної, слабкої, електромагнітної та сильної. Саме ядерні сили утримують протони всередині ядра. Нагадаємо, що гравітаційні та електричні сили зменшуються з відстанню: $F \sim \frac{1}{r^2}$. Експерименти засвідчують, що ядерні сили зменшуються з відстанню набагато швидше, тому кажуть, що ядерні сили є короткотривалими.

**Основні властивості ядерних сил**

1. Ядерні сили — на відміну від гравітаційних та електромагнітних — *короткотривалі сили*. Вимірювання показали, що інтенсивна взаємодія між нуклонами відбувається на відстанях, які приблизно дорівнюють розмірам нуклона. На більших відстанях діють лише електромагнітні сили.

2. Ядерні сили є дуже *потужними*. Вони у 100–1000 разів більші за електростатичні сили відштовхування двох протонів на близьких відстанях (приблизно 10^{-15} м).

3. Ядерні сили є *силами притягання*. Тому вони утримують нуклони всередині ядра.

4. Ядерні сили *діють між будь-якими нуклонами*: протон / протон, нейтрон / нейтрон, протон / нейтрон. У всіх цих випадках ядерні сили однакові.

5. Одна з прикметних властивостей ядерних сил — *властивість насичення* — полягає в тому, що нуклон виявляється здатним до ядерної взаємодії одночасно лише з невеликою кількістю нуклонів-сусідів.★

**Краплинна модель будови ядра**

За своїми властивостями ядерна матерія (агломерат із великої кількості нуклонів) багато в чому нагадує рідину. Тому фізики спробували поширити на ядерну матерію добре відомі уявлення про поведінку краплини рідини. Зокрема, було введено поняття поверхневого натягу та механізм подрібнення краплини на менші краплинки. Це дало змогу пояснити такі важливі явища, як обмежена кількість атомів у Періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва та розпад ядра Урану-235 під впливом зіткнення з нейтронами.

Зупинимося на кількості елементів у Періодичній системі хімічних елементів. Ви вже знаєте, що між нуклонами діють ядерні

сили, які притягують нуклони один до одного. Окрім того, між протонами діють кулонівські сили відштовхування. Зважаючи на властивість ядерних сил до насичення їх моделюють як поверхневий натяг у моделі краплини рідини. Тому енергія ядерних сил E_n прямо пропорційна поверхні S краплини. Енергія кулонівської взаємодії $E_{\text{кул}}$ прямо пропорційна кількості протонів у ядрі Z або об'єму краплини V . Нехай радіус краплини r . Тоді ці дві енергії можна подати у вигляді: $E_n \sim r^2$; $E_{\text{кул}} \sim r^3$.

Зрозуміло, що зі збільшенням r кулонівська енергія стає більшою за ядерну енергію і нарешті, за певних (великих) масових чисел A , ядро втрачає свою стійкість, тобто розпадається на частини. Ми дійшли висновку, що атоми з дуже великими масовими числами не можуть існувати. Ось чому останнім стабільним атомом у Періодичній системі є Уран.

3 Що таке енергія зв'язку атомного ядра

Щоб краще розібратися в енергетиці атомного ядра, на хвилину уявімо себе чарівниками. Візьмемо одне ядро і, скориставшись «чарівною» силою, «вимкнемо» електромагнітне відштовхування протонів. Тепер витягнемо по черзі кожний із нуклонів і спробуємо відповісти на запитання: яка система — ядро в цілому чи набір нуклонів — має більшу енергію?

Для правильної відповіді на це запитання згадаємо, що, хоча електромагнітне відштовхування було «вимкнене», ядерні сили притягання продовжували діяти. Тож чарівникам довелося докласти чималих зусиль, щоб «дістати» нуклони з ядра. Докладені зусилля означають виконану механічну роботу, або збільшення енергії. Виходить, що ядро в цілому мало меншу енергію, ніж його складники.

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

$$E_{\text{зв}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2 \geq 0,$$

де $Zm_p + (A - Z)m_n$ — маса всіх нуклонів, які входять до складу ядра; $m_{\text{я}}$ — маса ядра; c — швидкість світла у вакуумі.

Величина $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}$ отримала назву **дефект мас**. Отже, можемо записати:

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$$

У ядерній фізиці незручно використовувати одиниці СІ, тому зазвичай масу частинок подають в *атомних одиницях маси* (а. о. м.), а енергію — у *мегаелектрон-вольтах* (МеВ). Нескладно довести: якщо $\Delta m = 1$ а. о. м., то $E_{\text{зв}} = 931,5$ МеВ, отже:

$$E_{\text{зв}} = \Delta mk,$$

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



4 Як одержати ядерну енергію: синтез легких і поділ важких ядер

Фізичну величину f , яка чисельно дорівнює відношенню енергії зв'язку $E_{\text{зв}}$ ядра до масового числа A цього ядра, називають **питомою енергією зв'язку атомного ядра**:

$$f = \frac{E_{\text{зв}}}{A}$$

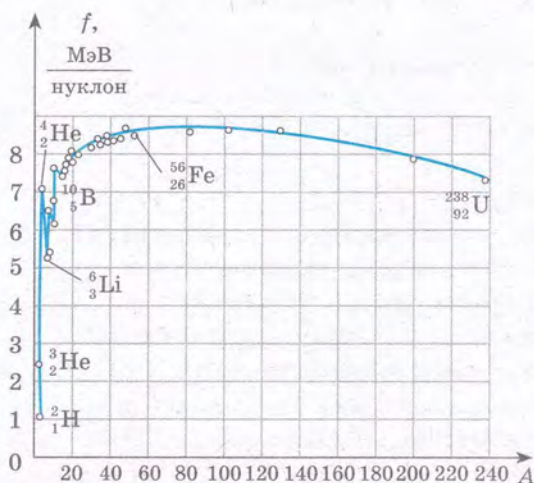


Рис. 54.1. Графік залежності питомої енергії зв'язку різних ядер від кількості нуклонів

Графік залежності $f(A)$ (рис. 54.1) має характерний вигляд: крива зростає від нуля, коли $A=1$; досягає «плато» у районі середніх значень масового числа, а потім плавно знижується. Такий характер залежності питомої енергії пояснюється краплинною моделлю ядра. Рис. 54.1 указує на способи, якими можна добути енергію з ядра атома. Видно, що існують два різні способи для виділення енергії. Перший полягає в поділі важкого ядра на частини. Сумарна маса складових частин буде меншою, ніж маса вихідного ядра. Різниця — це енергія, що виділилася. Такий шлях одержання енергії називають *поділом важких ядер*.

Другий шлях одержання енергії пов'язаний із висхідною віткою графіка на рис. 54.1. Об'єднання надлегких ядер в одне більше теж спричинить виділення енергії. Такі реакції називають *реакціями синтезу*.★

5 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Обчисліть питому енергію зв'язку нуклонів у ядрі ізотопу Гелію ${}^4_2\text{He}$. Маса ядра Гелію 4,00151 а. о. м., маса вільного протона 1,00728 а. о. м., маса вільного нейтрона 1,00866 а. о. м.

f — ?

Дано:

$$m_{\text{He}} = 4,00151 \text{ а. о. м.}$$

$$m_p = 1,00728 \text{ а. о. м.}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ а. о. м.}$$

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

$$A_{\text{He}} = 4$$

$$Z_{\text{He}} = 2$$

$$N_{\text{He}} = 2$$

Аналіз фізичної проблеми, пошук математичної моделі. Для розв'язання задачі скористаємося визначенням питомої енергії зв'язку:

$f = \frac{E_{\text{зв}}}{A}$. Енергію зв'язку можна визначити за дефектом маси Δm ядра: $E_{\text{зв}} = \Delta m k$, де $\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}$.

Розв'язання. За умовою в ядрі Гелію 2 протони та 2 нейтрони: кількість A нуклонів у ядрі дорівнює 4.

Використовуючи числові значення мас протона, нейтрона та ядра Гелію, одержуємо дефект мас в атомних одиницях маси:

$$\Delta m \approx 2 \cdot 1,007\,28 \text{ а. о. м.} + 2 \cdot 1,008\,66 \text{ а. о. м.} - 4,001\,51 \text{ а. о. м.} \approx 0,030\,37 \text{ а. о. м.}$$

Використовуючи перевідний коефіцієнт k , знайдемо енергію зв'язку:

$$E_{\text{зв}} \approx 0,030\,37 \cdot 931,5 \approx 28,29 \text{ MeV. Отже: } f \approx \frac{28,29}{4} \approx 7,07 \frac{\text{MeV}}{\text{нуклон}}.$$

Відповідь: питома енергія зв'язку нуклонів у ядрі ізотопу Гелію ${}^4_2\text{He}$

$$f \approx 7,07 \frac{\text{MeV}}{\text{нуклон}}.$$

★ 6 Навіщо потрібна високотемпературна плазма

Інший процес видобутку ядерної енергії відбувається за рахунок злиття легких ядер (див. початок графіка на рис. 54.1). Цей процес одержав назву «термоядерний синтез». *Термоядерним синтезом* називають процес множинного злиття легких ядер, яке відбувається за дуже високих ($\sim 10^9$ К) температур. Звернемо увагу на слово «множинного». Саме ця характеристика й пов'язана з технічним рішенням: перехід від одиничних актів реакцій до їхньої великої кількості. Високі температури, тобто великі енергії ядер, потрібні для подолання електростатичного бар'єра, зумовленого взаємним відштовхуванням ядер (однойменно заряджених частинок). Без цього неможливе зближення вихідних ядер на дистанцію дії ядерних сил. У природі такі умови реалізуються в надрах зір, де ізотопи Гідрогену перетворюються на Гелій. Фізики відтворили зоряні умови на Землі за рахунок створення та утримання високотемпературної плазми.★

! Підбиваємо підсумки

Взаємодію протонів і нейтронів забезпечують ядерні сили, які в сотні разів інтенсивніші, ніж електромагнітні, але мають дуже короткий радіус дії. До основних особливостей ядерних сил слід віднести такі: нуклони можуть взаємодіяти тільки з найближчими сусідами; ядерні сили однакові для будь-якої пари нуклонів. Поведінка ядерної матерії досить повно описується напівемпіричною краплинною моделлю.

У результаті дії ядерних сил притягання маса ядра елемента, що складається з ряду нуклонів, стає меншою, ніж сума мас нуклонів у його складі. Зазначена різниця має назву дефект мас Δm . Дефект мас визначає енергію зв'язку: $E_{\text{зв}} = \Delta mc^2$.

Видобування енергії з атомних ядер, з огляду на нелінійний характер залежності енергії зв'язку від масового числа, можливе у двох випадках: унаслідок злиття (синтезу) легких ядер і поділу важких.

★ Термоядерний синтез — це процес злиття легких ядер, що множинно відбувається за дуже високих ($\sim 10^9$ К) температур.★

? Контрольні запитання

1. Що таке ядерні сили? 2. Які властивості ядерних сил ви знаєте? 3. Які істотні відмінності між кулонівською взаємодією і ядерними силами? 4. Яку модель ядра ви знаєте? Опишіть її. 5. Поясніть на базі краплинної моделі ядра, чому не можуть існувати ядра з великими масовими числами. 6. Які можливі способи

видобування енергії з ядер з огляду на нелінійний характер залежності енергії зв'язку від масового числа? **7.** На якому принципі ґрунтується робота атомних станцій? ★ **8.** Який процес називають термоядерним синтезом? ★

**Вправа № 38**

1. Знайдіть дефект мас ядра Нітрогену ${}^{14}_7\text{N}$.
2. Для ядра якого елемента енергія зв'язку дорівнює нулю?
3. Яка питома енергія зв'язку ядра ${}^{56}_{26}\text{Fe}$?
4. Яку енергію треба витратити, щоб розділити ядро атома Літію ${}^7_3\text{Li}$ на протони та нейтрони, що його складають?
5. Яку кількість енергії можна отримати від ділення 1 г Урану ${}^{235}_{92}\text{U}$, якщо в ході кожного поділу виділяється енергія, що дорівнює приблизно 200 МеВ?