

Вступ

Основні етапи розвитку ядерної фізики. *Ядерна фізика* - це наука про структуру атомних ядер, властивості ядерних сил, закони змін і перетворень ядер при розпаді і ядерних реакціях, взаємодіях ядерного випромінювання з речовиною та елементарними частинками. Ядерна фізика широко застосовується в енергетиці і техніці, в біології і медицині. Нові дані про елементарні частинки продовжують змінювати і збагачувати наші уявлення про властивості матерії.

Свій розвиток ядерна фізика одержала в 1896 р., після відкриття А. Беке-ремем *природної радіоактивності* сполук урану - спонтанного випускання променів високої проникаючої спроможності. Той же ефект спостерігався у відкритих незабаром П. Кюрі і М. Склодовською-Кюрі елементів - радію і полонію.

При проведенні досліджень з відхилення цих променів у магнітному полі Резерфорд показав, що вони складаються з трьох різноманітних компонент:

α -променів - потоку позитивно заряджених частинок; β -променів - потоку частинок, заряджених негативно, γ -променів, що не відхиляються в магнітному полі. Пізніше з'ясувалося, що α -промені - це частинки, що несуть подвійний елементарний заряд і мають масу, що приблизно дорівнює масі атома гелію, у той час як β -промені є потоком швидких електронів, а γ -промені поводять себе, як рентгенівські промені більшої жорсткості.

При дослідженні розсіювання α -частинок у речовині, Е. Резерфорд дійшов висновку, що в атомі, який має розміри приблизно 10^{-10} м, маса зосереджена в невеличкій позитивно зарядженій серцевині - в атомному ядрі, поперечник якого має розмір біля 10^{-14} м, тобто, в багато разів менший, ніж розміри всього атома.

На підставі цих досліджень у 1911р. Е. Резерфорд запропонував ядерну модель атома, згідно якої атом складається з важкого позитивно зарядженого ядра та у тисячі разів більш легкої оболонки, утвореної електронами. Електрони обертаються навколо ядра та утримуються поблизу нього електричними

силами на відстанях, якими і визначається розмір всього атома. Оскільки атоми є електронейтральними, то *атомний номер* Z , який визначає заряд ядра і хімічні властивості елементів, дорівнює кількості електронів на зовнішній оболонці.

Проте, з точки зору класичної фізики не можна було пояснити існування стабільних атомів такої структури, оскільки, згідно з законами електродинаміки, кожен електрон, що рухається по колу навколо ядра, повинен втрачати свою енергію на випромінювання, поступово наближатись до ядра і, зрештою, упасти на нього. При цьому повинна неперервно змінюватись частота обертання електрона навколо ядра і, отже, частота атомного випромінювання. У той же час було відомо, що атомні спектри мають строго визначений дискретний і стаціонарний характер.

Для усунення цих протиріч у 1913 р. Н. Бор запропонував модель атома, принципово новим елементом якої в порівнянні з моделлю Е. Резерфорда була наявність особливих стаціонарних електронних орбіт. Згідно з припущенням Бора, особливість орбіт полягає в тому, що електрони, які знаходяться на них, з невідомих причин не втрачають енергію на випромінювання і мають строго визначений момент кількості руху, кратний сталій Планка h :

$$2\pi m_e v r = n h, \quad (1)$$

де m_e – маса електрона, v – швидкість електрона, r – радіус орбіти, n – *головне квантове число*, яке приймає значення $=1, 2, 3, \dots$.

Перехід електрона з однієї стаціонарної орбіти на іншу повинен супроводжуватись поглинанням або випусканням порції електромагнітної енергії у вигляді кванта світла з енергією

$$h\nu = E_n - E_m, \quad (2)$$

де E_n і E_m – енергії електрона на n -й і m -й стаціонарних орбітах.

Ці дві умови були введені у вигляді постулатів, і на їх підставі було пояснено багато експериментальних результатів. Проте, в самій основі теорії Бора було закладено непослідовність. З одного боку, він припускав, що кла-

сичні принципи механіки та електродинаміки взагалі правильні і електрон має звичайні властивості зарядженої корпускули. З іншого боку, стверджувалось, що для електрона в атомі існують деякі винятки, які з невідомих причин суперечать класичним уявленням.

Ця трудність була розв'язана тільки після створення в 1926 р. В. Гейзенбергом і Е. Шредінгером послідовної теорії - *квантової механіки*, яка заснована на більш загальних законах матерії, що у макросвіті зводяться до законів класичної фізики, але в мікросвіті відповідають цілком новим властивостям частинок. Зокрема, відповідно до нових, хвильових властивостей електрона - немає таких станів частинки, у яких вона володіла б одночасно точно визначеним положенням і швидкістю. За умов, коли відмінність законів квантової механіки від законів класичної фізики стає істотною, вже не можна вважати, що електрони рухаються по визначених траєкторіях. Фізичні властивості частинок роблять такий опис неадекватним. Замість цього стан частинок необхідно описувати *хвильовою функцією*.

Для кожної конкретної системи вона може бути знайдена, як розв'язок фундаментального рівняння квантової механіки - хвильового рівняння В. Шредінгера. Наприклад, вважається, що для електрона в атомі такий фізично осмислений розв'язок існує тільки для виділеної послідовності значень енергії і моменту кількості руху. Ці „дозволені”, або „власні” стани і їх „власні значення” енергії і моменту кількості руху саме і відповідають станам, що були введені Н. Бором. Проте, при цьому уявлення про орбіти електронів стає недійсним і відпадає. Електрон може бути виявленим не на деяких орбітах, а з різною ймовірністю у всьому об'ємі атома. Ймовірність виявлення його в даній точці визначається квадратом модуля хвильової функції в цій точці.

Квантова механіка не тільки підтвердила ряд результатів теорії Н. Бора, але і зуміла пояснити інші експериментальні факти. У 1919 р. Е. Резерфорд спостерігав розщеплення ядер різноманітних речовин при бомбардуванні їх α -частинками. При цьому з ядер вилітали однократно позитивно заряджені

частинки з масою, яка дорівнює масі ядра атома водню, і у 1836 разів перевищує масу електрона. Цим було доведено, що у складі різноманітних ядер вміщуються ядра водню; їх називають *протонами* і позначають символом p .

Після відкриття протонів фізикам здавалося, що ядро побудоване з A протонів і $(A-Z)$ електронів. Протони заряджені позитивно, отже, в одиницях електронного заряду (взятого по абсолютній величині) заряд ядра дорівнює $A-A+Z=Z$. Навколо ядра обертається Z електронів на відстанях біля 10^{-8} см. Але уявлення про те, що електрони входять до складу ядра, суперечило багатьом експериментальним фактам.

У 1930р. В. Боте і Р. Бекер піддавали берилій впливу α -частинок, що випромінювались полонієм, і спостерігали випромінювання з великою проникаючою спроможністю. Здавалося, що це були γ -промені. Однак, І. Жоліо-Кюрі і Ф. Жоліо встановили, що коли помістити на шляху випромінювання парафін, то з парафіну вилітають протони великої енергії. Такий вид взаємодії γ -випромінювання з речовиною не був відомий. Щоб така взаємодія могла існувати треба було б приписати γ -променям енергію, значно більшу, ніж вони могли мати при подібних реакціях. Тільки в 1932р. Дж. Чадвік довів існування електрично нейтральної частинки з масою, майже такою, як і у протона. Ця частинка була названа *нейтроном* і позначена символом n .

Відразу ж після цього відкриття, незалежно В. Гейзенбергом і Д. Іваненко, була висловлена гіпотеза про те, що ядро побудовано з протонів і нейтронів, причому, повна їх кількість визначає масу ядра A , а кількість лише протонів - заряд ядра Z . Виникло запитання: які сили утримують протони і нейтрони в ядрі, яка їх природа? Оскільки нейтрон не має заряду, то ці сили не можуть бути електричними. Стало зрозумілим, що крім відомих раніше *кулонівських* і *гравітаційних* сил повинні існувати нові - *ядерні* сили. Виникло запитання про природу цих сил. З відкриттям нейтрона почався новий етап у розвитку науки про ядро.

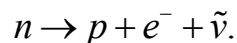
Наприкінці 1932р. у космічних променях К. Андерсоном і Р. Мілікеном був відкритий *позитрон* - частинка з масою електрона, але позитивно заря-

джена. Її існування було прогнозовано П. Діраком з чисто теоретичних уявлень, а виявлені пізніше властивості позитрона точно відповідали очікуванім.

При проведенні подальших досліджень β -розпаду атомних ядер було виявлено порушення в балансі енергії. Зокрема, виникало протиріччя з законом збереження енергії і законом збереження моменту кількості руху.

Було показано, що спектр випромінювання електронів має неперервний характер, а їх середня енергія значно менше енергії, що втрачається ядром при розпаді. Вихід був знайдений В. Паулі, який запропонував гіпотезу про існування ще однієї нейтральної частинки з високою проникаючою спроможністю, яку було названо *нейтрино* ν . Така частинка разом з електроном відносить додаткову енергію при вильоті з ядра при β -розпаді, але через відсутність заряду залишається непоміченою. Ця гіпотеза була прийнята і увійшла в теорію, хоча існування нейтрино у вільному стані було виявлено експериментально пізніше, ніж через двадцять років.

Для того, щоб на основі гіпотези про нейтрино побудувати послідовну теорію β -розпаду, Е. Фермі припустив наявність нового типу взаємодії частинок - β -взаємодії (*слабкої взаємодії*). Ця взаємодія, відповідно до його теорії, обумовлює β -розпад, тобто, розпад нейтрона на протон, електрон і антинейтрино



У 1934р. І. Тамм показав, що з факту існування такої β -взаємодії повинна випливати наявність деякого потенціалу сил між нейтроном і протоном. Механізм його полягає в тому, що нуклони обмінюються парами частинок (електрон - нейтрино і т.п.). Звідси стало можливим пояснити природу ядерних сил. Проте ці сили надзвичайно слабкі і не можуть бути тими основними силами, що забезпечують стійкість ядер.

У 1935р. японський фізик Х. Юкава на основі цих ідей показав, що ядерні сили можуть мати у своїй основі обмін якимось іншими частинками - квантами поля ядерних сил. При цьому для пояснення малого радіуса ядерних сил

потрібно було припустити, що вони повинні мати масу біля 200-300 електронних мас.

У 1938р. подібні частинки були відкриті в космічних променях і одержали назву μ -мезонів. Проте вивчення їх властивостей показало, що і вони не можуть бути носіями ядерної взаємодії, оскільки самі слабо взаємодіють з ядерними частинками.

Тільки в 1947р. С. Пауелом у космічних променях були виявлені ядерно-активні частинки π -мезони з масою порядку $270 \cdot m_e$, що і є квантами поля ядерних сил. Таким чином, було встановлено, що в основі існування ядерних сил між нуклонами лежить взаємодія через поле, квантами якого є π -мезони і деякі інші пізніше відкриті види мезонів.

Роботи з вивчення взаємодій між нуклонами і ядрами розвивалися особливо інтенсивно після відкриття методів штучного прискорення частинок. У 1932р. Дж. Кокрофт і Е. Уолтон побудували установку, в якій одержали пучок швидких протонів. При бомбуванні такими прискореними протонами мішені з різноманітних речовин можна було спостерігати процеси розщеплення ядер. Подальший розвиток прискорювальної техніки дав можливість одержувати також швидкі електрони, дейтрони, α -частинки та інші частинки.

За останній час розвиток уявлень про структуру ядер, про елементарні частинки, про властивості ядерних сил відбувався дуже швидко.

Експерименти були спрямовані на спостереження ядерних процесів при більш великих енергіях шляхом використання потужних прискорювачів і удосконалення методів реєстрації випромінювання космічних променів, у складі яких є частинки величезної енергії аж до 10^{19} еВ. Так, у підтвердження теорії П. Дірака були знайдені античастинки, що відповідають відомим елементарним частинкам: у 1955р. - *антипротон*, а в 1956р. - *антинейтрон*.

Світ елементарних частинок неперервно розширював свої межі: були відкриті *гіперони* – частинки з масою, більшою ніж маса протона. Було виявлено існування двох різноманітних нейтрино: електронного і мюонного. Величезне значення для науки мало відкриття незберігання парності в слабких взає-

модіях і спіральності нейтрино.

В даний час виявляються все нові і нові частинки, що відносяться до класу так званих *резонансів* з часом життя порядку $10^{-22} \div 10^{-23}$ с, які розпадаються на декілька відомих раніше частинок з набагато більшим часом життя.

Таким чином, відбулися якісні зміни в розумінні того, що таке елементарна частинка. Дослідження розвіяли уявлення про елементарну частинку, як про щось вічне, незмінне і нероздільне. Виявилось, що всі елементарні частинки мають складну структуру, можуть народжуватися і вмирати, перетворюючись в інші елементарні частинки або у випромінювання.

Народилася фізика елементарних частинок. В теперішній час їх відомо вже більш 200. Поки ще не існує чіткої єдиної теорії елементарних частинок, хоча накопичено багато експериментальних фактів. Кожен день приносить нові дані і розширює наші пізнання про природу явищ у світі атомних ядер і елементарних частинок.

Масштаби фізичних величин. Дослідження мікросвіту показують, що атоми й елементарні частинки підпорядковуються закономірностям, що значною мірою відрізняються від закономірностей макросвіту. Певною мірою це пов'язано з переходом до інших масштабів розмірів, швидкостей, енергій і інших фізичних величин. Водночас не варто думати, що макросвіт і мікросвіт розділені чіткою і непорушною межею, по одну сторону якої існують одні закони, а по другу - інші.

Всі закони, що діють у мікросвіті, поширюються і на макросвіт, але завдяки іншому масштабу об'єктів форма цих законів і особливості їх використання змінюються і переходять у звичайні, добре відомі закономірності макросвіту. Іншими словами, закони макросвіту є частковими або граничними випадками більш загальних законів мікросвіту, що для об'єктів макросвіту дають несуттєві поправки до результатів класичної механіки.

Розглянемо масштаби величин, характерних для світу елементарних частинок.

Довжина. Розмір атома має порядок 10^{-10} м. Ця величина характеризує ра-

діус орбіти зовнішніх електронів. Розміри ядра в $10^4 \div 10^5$ разів менше розмірів атома й за порядком дорівнюють $10^{-14} \div 10^{-15}$ м. Відстань 10^{-15} м одержала назву 1Фермі. У сучасних експериментах спромоглися розрізнити відстані до 10^{-3} Фермі або 10^{-18} м.

Енергія. Середня кінетична енергія теплового хаотичного руху атомів і молекул може служити свого роду еталоном для порівняння енергій.

Згідно закону Больцмана, якщо частинки рухаються в середовищі з тепловими швидкостями, то в середньому вони мають кінетичну енергію, рівну $(3/2)kT$. Найбільш ймовірна енергія при цьому буде дорівнювати kT . При кімнатних температурах ($T \approx 300\text{K}$) тепла енергія молекули або атома становить соті частки електрон-вольта.

Нагадаємо, що один електрон-вольт відповідає енергії, що одержується або, що втрачається частинкою з одиничним електричним зарядом при проходженні нею різниці потенціалів у 1В.

Більш великі одиниці енергії - це мегаелектрон-вольт $10^6\text{eV}(\text{MeV})$ і гігаелектрон-вольт $10^9\text{eV}(\text{GeV})$

Енергія зв'язку протонів і нейтронів у ядрі дорівнює в середньому $8 \cdot 10^6\text{eV}$. У прискорювачах частинки одержують значно більші енергії, порядку $10^9 \div 10^{10}\text{eV}$. А деякі частинки космічного випромінювання несуть енергії $(10^{12} \div 10^{19})\text{eV}$.

Швидкості. Абсолютна границя швидкостей усіх рухів - швидкість світла; ніякі сигнали, ніякі тіла не можуть мати швидкість, що перевищує швидкість світла у вакуумі $c = 3 \cdot 10^8\text{м/с}$.

З швидкістю світла поширюються електромагнітні хвилі і нейтрино, що не мають маси. Інші елементарні частинки, які володіють масою, можуть мати швидкість, як завгодно близьку до швидкості світла, але завжди менше її. Ці експериментальні дані покладено в основу теорії відносності. Теорія відносності дозволяє розрахувати кінетичну енергію електрона, що рухається зі швидкістю близькою до швидкості світла:

$$T = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_e c^2, \quad (3)$$

де m_e - маса спокою електрона, v - швидкість електрона.

Підставивши сюди значення енергії $T=10^6\text{eV}$ і $T=10^9\text{eV}$, бачимо, що при кінетичній енергії в 10^6eV швидкість електрона становить більш ніж 94% від швидкості світла, а при енергії 10^9eV швидкість електрона лише на половину мільйонної частки відрізняється від швидкості світла.

Швидкість протона (частинки в 1836 разів важкої за електрона) при кінетичній енергії в 10^9eV дорівнює 85% швидкості світла.

Інакше кажучи, швидкості елементарних частинок порівняні зі швидкістю світла. Тому швидкість світла і обирають у якості величини, що характеризує масштаб швидкостей у мікросвіті.

При великих швидкостях і енергіях необхідно користуватися релятивістською механікою. Релятивістські властивості частинок і фізичних величин необхідно враховувати, коли швидкості наближаються до швидкості світла.

Час. У світі, де відстані вимірюються в одиницях фермі, а швидкість - у долях швидкості світла, масштаб часу протікання явищ повинен істотно відрізнятися від звичних нам. Якщо поділити 10 Фермі на швидкість світла, тобто, оцінити приблизно, за який час частинка, рухаючись із швидкістю світла, перетне ядро по діаметру, то отриманий проміжок часу дорівнюватиме

$$\frac{10 \cdot 10^{-15} \text{ см}}{3 \cdot 10^8 \text{ см/с}} \approx 10^{-23} \text{ с}.$$

Час 10^{-23}с іноді називають *ядерним часом*. Їм визначається часовий масштаб у світі елементарних частинок.

Маса. Маса m відображує інертні і гравітаційні властивості частинок. Масою визначається також наявний у частинки запас енергії. Відповідно до теорії відносності повна енергія тіла, що рухається зі швидкістю v , дорівнює

$$E = m c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

При $v \ll c$, розвинувши за степенями v/c , отримаємо $E \approx \frac{m_0 v^2}{2} + m_0 c^2$

Повна енергія тіла складається, таким чином, із кінетичної енергії та енергії спокою. Тіло з масою спокою m_0 має запас власної енергії E_0 , що пов'язана з масою спокою співвідношенням $E_0 = m_0 c^2$.

За одиницю маси елементарних частинок приймають масу спокою електрона, що дорівнює $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Якщо її виразити в енергетичних одиницях, то масі спокою електрона відповідає власна енергія, яка дорівнює

$$m_e c^2 = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 8,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,511 \text{ (MeV)}$$

Маси ядра й атома в ядерній фізиці вимірюються в *атомних одиницях маси*. За одну атомну одиницю маси (АОМ) приймається 1/12 маси атома вуглецю С. Щоб виразити значення атомної одиниці маси в грамах, треба взяти обернену величину від числа Авогадро N_A

$$1 \text{ АОМ} = \frac{1}{16} \cdot \frac{16}{N_A} = \frac{1}{6,023 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ (г)}.$$

Момент кількості руху. Квантовою одиницею моменту кількості руху є величина $\hbar$:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34}}{2\pi} = 1,024 \cdot 10^{-34} \text{ (Дж)}$$

Електрон в атомі має величину моменту кількості руху порядку одного або декількох $\hbar$.

Електричний заряд у ядерній фізиці вимірюється в одиницях заряду електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

1. ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ АТОМНИХ ЯДЕР

1.1. ЗАРЯД І МАСА ЯДРА

Як відзначалося раніше, ядро складається з протонів і нейтронів, що утримуються ядерними силами. Якщо вимірювати масу ядра в атомних одиницях маси, то вона буде дорівнювати масі протона, помноженій на ціле число A , що називають масовим числом. Якщо заряд ядра Z , а масове число A , то це означає, що до складу ядра входить Z протонів і $(A-Z)$ нейтронів. (Число нейтронів у складі ядра позначається відповідно через $N=A-Z$).

Ці властивості ядра відбиті в символічних позначеннях, що будуть використані надалі у вигляді ${}_Z^AX$, де X - назва елемента, атому якого належить ядро (наприклад, ядра: гелію— ${}_2^4He$, кисню— ${}_8^{16}O$, заліза— ${}_{26}^{57}Fe$, урану— ${}_{92}^{235}U$).

До числа основних характеристик *стабільних ядер* можна віднести: заряд, масу, радіус, механічний і магнітний моменти, спектр збуджених станів, парність і квадрупольний момент. *Радіоактивні (нестабільні)* ядра додатково характеризуються часом життя, типом радіоактивних перетворень, енергією випускання частинок і низкою інших спеціальних властивостей, про які буде сказано далі.

Розглянемо властивості елементарних частинок, з яких складається ядро: протона і нейтрона.

Маса. У одиницях маси електрона: маса протона $m_p=1836,1 \cdot m_e$, маса нейтрона $m_n=1838,6 \cdot m_e$.

У атомних одиницях маси: маса протона $m_p=1,00759 \text{ а.о.м.}$; маса нейтрона $m_n=1,00898 \text{ а.о.м.}$

У енергетичних одиницях маса спокою протона $m_p=938,3 \text{ Мев}$; маса спокою нейтрона $m_n=939,6 \text{ Мев}$.

Електричний заряд, q - параметр, що характеризує взаємодію частинки з електричним полем, виражається в одиницях заряду електрона $q_e=-e$, де $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Всі елементарні частинки несуть заряд або 0, або $\pm e$. Заряд протона $q_p = +1e$. Заряд нейтрона дорівнює нулю.

Заряд ядра Ze , що дорівнює числу протонів у ядрі, визначає місце відповідного елемента в таблиці Д. Менделєєва. Хімічно однакові елементи з однаковим числом Z , але різним A , тобто з однаковим числом протонів, але різним числом нейтронів у ядрі називаються *ізотопами*. Наприклад, водень має два ізотопи - дейтерій і тритій:

$${}^1_1\text{H} - \text{водень}, {}^2_1\text{H} - \text{дейтерій}, {}^3_1\text{H} - \text{тритій}.$$

До теперішнього часу відомо близько 280 стійких і понад 1450 нестійких радіоактивних ізоотопів.

Ядра з однаковим числом нуклонів A , але з різним Z , тобто з різним числом протонів і нейтронів у ядрі називаються *ізобарами*. Наприклад, тритій має ізобар—один з ізоотопів гелію:

$${}^3_1\text{H} - \text{тритій}; {}^3_2\text{He} - \text{гелій}.$$

Як правило, стійкі ізобари зустрічаються парами, а атомні номери їх відрізняються на дві одиниці. З відомих у даний час 60 стійких ізобарних пар тільки дві пари (${}^{113}_{48}\text{Cd}$, ${}^{113}_{49}\text{In}$, ${}^{123}_{51}\text{Sb}$, ${}^{123}_{52}\text{Te}$) мають непарні масові числа і їх порядкові номери відрізняються на одиницю, а не на два. Інші ізобари мають парні A і Z .

1.2. ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ ЯДРА

Ядро являє собою систему з A елементарних частинок-нуклонів, які утримуються разом силами притягнення і рухаються всередині ядра з нерелятивістськими швидкостями.

Повна енергія ядра E пов'язана з його масою співвідношенням А. Ейнштейна:

$$E = Mc^2.$$

Точні виміри мас ядер показали, що маса складного ядра не дорівнює сумі мас частинок, що входять до складу ядра, а завжди менше цієї суми на декі-

лька десятих відсотків. Маса ядра визначається співвідношенням

$$M_{\text{я}} = Zm_p + (A-Z)m_n - \Delta M \quad (1.1)$$

де m_p і m_n - відповідно маси протона і нейтрона.

Різниця ΔM між сумою мас нуклонів і масою ядра характеризує енергію зв'язку цих нуклонів у ядрі, тобто енергію, яку треба витратити, щоб розділити дане ядро на нуклони, що його складають.

У більшості експериментів легко вимірювати масу атома $M_{\text{ат}}$, що відрізняється від маси ядра на величину маси електронів. Оскільки число електронів в атомі завжди дорівнює числу протонів у ядрі, маса атома може бути записана у вигляді

$$M_{\text{ат}} = ZM_H + (A-Z)m_n - \Delta M, \quad (1.2)$$

де маса атома водню

$$M_H = m_p + m_e \quad (1.3)$$

Енергія зв'язку електронів в атомі набагато менша в порівнянні з енергією зв'язку ядра і тому у співвідношеннях (1.2) і (1.3) не враховується.

Із співвідношення (1.1) випливає, що енергія ядра $E = Mc^2$ відрізняється від сумарної енергії спокою частинок, що складають ядро, і не пов'язані одна з одною $[ZM_H + (A-Z)m_n]c^2$.

Різниця цих величин є повною енергією зв'язку ядра

$$\Delta E = \Delta Mc^2 = [Zm_p + (A-Z)m_n - M_{\text{я}}]c^2 \quad (1.4)$$

Таким чином, знаючи маси ядер і маси нуклонів, можна чисельно визначити енергії зв'язку ядер. Якщо відомі маси нейтральних атомів, то

$$\Delta E = [ZM_H + (A-Z)m_n - M_{\text{ат}}]c^2 \quad (1.5)$$

При утворенні ядер шляхом з'єднання нуклонів повинна виділятися енергія, що дорівнює енергії зв'язку ядра.

Наведемо величини енергій зв'язку для деяких ядер: $\Delta E(^{32}_{16}\text{S}) = 270 \text{ MeV}$; $\Delta E(^4_2\text{He}) = 28 \text{ MeV}$.

Нерідко замість енергії зв'язку користуються величиною, яку називають *дефектом маси*. Дефект маси δ дорівнює різниці між масою і масовим числом

$$\delta = M(AOM) - A.$$

$$1 AOM = \frac{1}{12} M_6^{12}C, \quad m_p = 1,0009 AOM$$

$\delta = 0$ - для ${}^{12}_6C$ по визначенню

$\delta > 0$ - даний нуклон зв'язаний у ядрі слабше, ніж у ядрі ${}^{12}_6C$;

$\delta < 0$ - зв'язаний сильніше, ніж в ${}^{12}_6C$

Крім дефекту маси користуються так званим *пакувальним коефіцієнтом* (або *пакувальним множником*), що дорівнює дефекту маси одного нуклона

$$f = \frac{\delta}{A} = \frac{M - A}{A} \quad (1.6)$$

У багатьох випадках, наприклад для порівняння стійкості ядер, користуються величиною, яка називається *питомою енергією зв'язку* – ε . Вона характеризує середню енергію зв'язку одного нуклона в ядрі.

Величина ε дорівнює відношенню повної енергії ΔE до повного числа нуклонів у ядрі A :

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{A} = \frac{\Delta M c^2}{A} \quad (1.7)$$

Тобто, ε - це та енергія, що у середньому треба витратити, щоб видалити з ядра один нуклон, без надавання йому кінетичної енергії. Чим більше значення ε , тим стійкіше ядро.

Аналіз експериментальних енергій зв'язку дає багато інформації про властивості атомних ядер. Розглянемо приведену на рис.1.1 експериментальну залежність $\varepsilon = f(A)$. Можна побачити, що при малих A величина ε змінюється нерегулярно і має аномальний малий розмір у порівнянні з середнім значенням.

Так, наприклад, тритій (3_1H) має $\varepsilon = 2,78 \text{ MeV}$. Далі величина ε повільно зростає зі збільшенням A до значення $8,5 \text{ MeV}$ при $A=50$, а потім до $A=150$ залишається приблизно сталою і далі повільно спадає при збільшенні A , досягає для урану $7,4 \text{ MeV}$.

З ходу залежності ε від A випливає декілька дуже важливих висновків, на

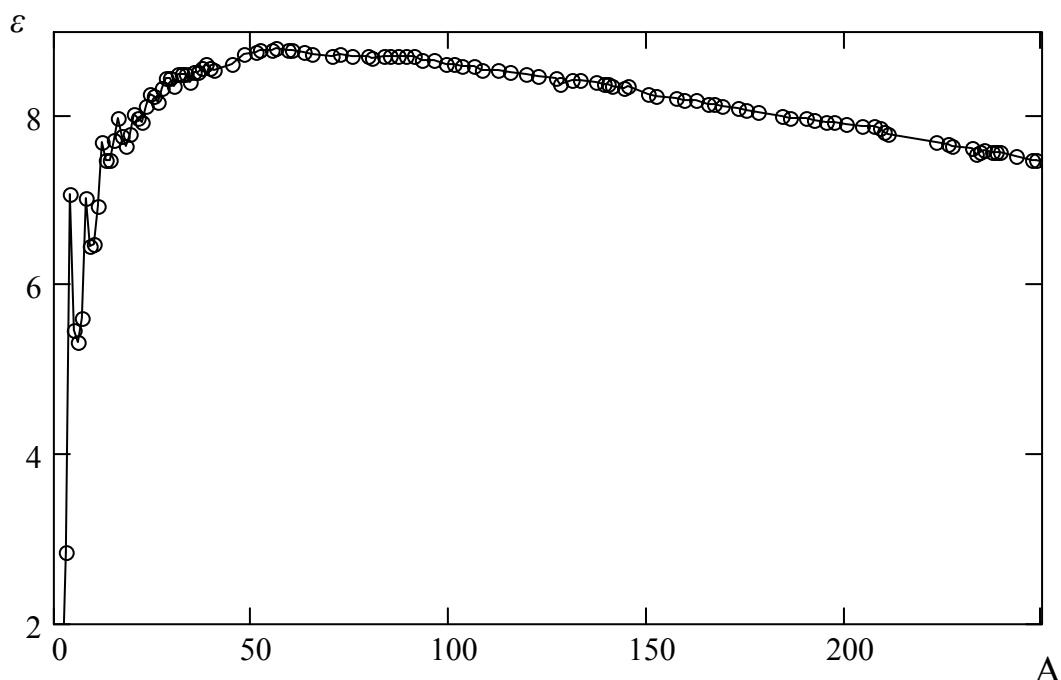


Рис.1.1. Залежність питомої енергії зв'язку атомних ядер від масового числа A .

яких повинна базуватися теорія ядерних сил.

1. Повну енергію зв'язку ядра можна грубо вважати пропорційною числу нуклонів в ядрі A , оскільки для більшості ядер ε майже стала, а $\Delta E = \varepsilon A$. Це означає, що нуклон спроможний до взаємодії не з всіма нуклонами, а тільки з їх обмеженим числом. Дійсно, якби кожний нуклон ядра взаємодівав з всіма іншими $(A-1)$ нуклонами, то сумарна енергія зв'язку була би пропорційною

$$A(A-1) \approx A^2, \quad (1.8)$$

а не просто A . Це свідчить про те, що ядерні сили мають *властивість насичення*.

2. При більш ретельному розгляді поведінки ε , як функції A , виявляється, що енергія зв'язку максимальна у парно-парних ядер $^{16}_8\text{O}$, $^{12}_6\text{C}$, тобто у ядер з парним числом протонів і парним числом нейтронів. Це вказує на особливу міцність системи чотирьох нуклонів: $2p$ і $2n$, тобто на існування в ядрі об'єднання однакових нуклонів у групи.

3. Питома енергія зв'язку має невеличкі максимуми для ядер, що мають число протонів або нейтронів 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Дані числа називаються

магічними. Цей факт може свідчити про те, що ядро, подібно атому, має **оболонкову структуру** і найбільш стабільно, коли оболонка цілком заповнена. Особливою міцністю відрізняються двічі магічні ядра, тобто ядра, що мають магічне як число протонів, так і число нейтронів ${}^4_2\text{He}(Z = 2, N = 2)$, ${}^{16}_8\text{O}(Z = 8, N = 8)$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}(Z = 20, N = 20)$, ${}^{48}_{20}\text{Ca}(Z = 20, N = 28)$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}(Z = 82, N = 126)$. Крім того, для ядер, що містять магічне число протонів, характерна сферична симетрія розподілу зарядів у не збуджених станах. Такою поведінкою магічні ядра нагадують атоми інертних газів, що характеризуються сферичною симетрією, хімічною пасивністю найбільшими енергіями іонізації.

Магічні ядра за рахунок їх підвищеної стійкості більш поширені у Всесвіті, ніж їх немагічні сусіди. Магічні ядра мають найбільше число стабільних ізотопів. Більш детально існуючі ядерні моделі будуть розглянуті в 1.7.

4. Якщо побудувати залежність питомої енергії зв'язку для легких ядер від Z при фіксованому значенні A , то вона буде мати максимум при $Z=A/2$.

Це вказує на те, що легкі ядра найбільш стійкі коли число протонів дорівнює числу нейтронів. Для важких ядер максимум зміщується в сторону $Z < A$, тобто важкі ядра більш стійкі, коли число нейтронів перевищує число протонів.

5. З ходу кривої (рис.1.1) очевидно також, що якщо об'єднати два легких ядра в ядро середньої ваги або розділити одне важке ядро на два середніх ядра, то повинна виділитися енергія за рахунок збільшення енергії зв'язку в новоутворених ядрах. Процеси першого типу – процеси **синтезу** легких ядер неперервно йдуть у Всесвіті, виступають джерелом випромінювальної енергії зірок, лежать в основі **термоядерного синтезу**. Процеси другого типу – **поділ** важких ядер – використовується для отримання енергії в атомній енергетиці.

1.3. КРАПЛИННА МОДЕЛЬ ЯДРА. НАПІВЕМПІРИЧНА ФОРМУ-