**07.04 ТЕМА: Ядерні сили та їх особливості.**

Усі тіла навколишньої живої й неживої природи складаються з дрібних частинок— атомів: Першими, хто висловив припущення про це, вважаються давньогрецькі філософи Левкіпп і Демокріт. Саме вони назвали атомом дрібну неподільну частинку, що утворює речовину. Вони вважали, що речовини утворюються в результаті зіткнення атомів і появи зв'язків між ними. Ні природу, ні механізм утворення цих зв'язків вони не уточнювали, зате зробили припущення про форму атомів. Вони вважали, що атоми мають форму правильних багатогранників: куба («атоми землі»), тетраедра («атоми вогню»), октаедра («атоми повітря»), ікосаедра («атоми води»).

Більше двадцяти століть знадобилося вченим для того, щоб експериментально підтвердити атомістичну теорію будови речовини. Остаточно ця ідея утвердилася в науці в другій половині дев'ятнадцятого століття. До початку двадцятого століття фізики вже мали досить інформації про масу й розміри атома. На той час стало зрозумілим, що атоми не є дрібними частинками в складі речовини. Вони мають певну внутрішню структуру, розгадка якої дозволила б пояснити періодичність властивостей хімічних елементів. Однак тільки експерименти англійського фізика Ернеста Резерфорда стали основою для створення сучасної протонно-нейтронної моделі атома.

  Розщеплення ядра. Протон.

У 1919 році Резерфорд зробив чергове сенсаційне відкриття. Йому вдалося розщепити ядро. Вивчаючи зіткнення а-частинок із легкими атомами, Резерфорд встановив, що при ударі а-частинки об ядро Гідрогену воно збільшує свою швидкість у 1,6 разу й відбирає 64 % енергії а-частинки. У результаті зіткнень атомів Нітрогену з а-частинками виходять частинки з максимальним пробігом, що відповідає пробігу атомів Гідрогену. «З отриманих досі результатів, — писав Резерфорд, — важко уникнути висновку, що атоми з великим пробігом, які виникають при зіткненні а-частинок з Нітрогеном, є не атомами Нітрогену, але, цілком ймовірно, атомами Гідрогену або атомами з масою 2. Якщо це так, то ми повинні визнати, що атом Нітрогену розпадається унаслідок величезних сил, які розвиваються при зіткненні зі швидкою α-частинкою, і що атом Гідрогену, який звільняється, утворює складову частину атома». Так була уперше висловлена думка про те, що ядра Гідрогену є основною частиною ядер атомів. Пізніше для позначення ядер Гідрогену був запропонований термін «протон». Великим кроком до встановлення будови атома стала гіпотеза Марії Склодовської-Кюрі про те, що до складу ядра входять електрони. Спираючись на неї, Резерфорд припустив, що в природі існують ядра з масою одного, двох і трьох ядер Гідрогену, але з нульовим зарядом. Резерфорд писав, що йому «здається досить правдоподібним, що один електрон може зв'язати два Н-ядра і, можливо, навіть і одне Н-ядро. Якщо справедливим є перше припущення, то воно вказує на можливість існування атома з масою близько 2 і з одним зарядом. Таку речовину потрібно розглядати як ізотоп Гідрогену. Друге припущення містить у собі думка про можливості існування атома з масою 1 і нуклеарним зарядом, що дорівнює нулю. Подібні утворення видаються цілком можливими». Так була висловлена гіпотеза про існування нейтрона і важкого ізотопу Гідрогену.

**Сучасні теорії будови атомного ядра.**

**Протонно-нейтронна модель ядра.**

Сьогодні фізики усього світу користуються теорією про те, що ядро складається з елементарних частинок — протонів і нейтронів. Уперше таке припущення висловив у 1932 році радянський фізик Д. Д. Іваненко. Однак протонно-нейтронна модель ядра не відразу була прийнята ученими. Навіть Резерфорд стверджував, що нейтрон — лише складне утворення протона й електрона. У 1933 році Іваненко виголосив доповідь про моделі ядра, відстоюючи протонно-нейтронну теорію. Він спирався на те, що в ядрі є тільки важкі частинки.

Іваненко відкинув ідеї про складну структуру нейтрона й протона. На його думку, обидві частинки повинні мати однаковий ступінь елементарності, тобто і нейтрон, і протон можуть переходити один в одного. Надалі протон і нейтрон почали розглядатися як два стани однієї частинки — нуклона, й ідея Іваненко стала загальноприйнятою, а незабаром у складі космічних променів була відкрита ще одна елементарна частинка — позитрон.

Зараз протонно-нейтронна модель ядра вже не викликає сумнівів. Крім того, протягом довгого часу існувала гіпотеза про те, що в ядрі можуть знаходитися також і електрони. Однак вона мала дуже багато протиріч і не була підтверджена експериментально. Так, відповідно до цієї гіпотези, масове число повинно відповідати загальній кількості протонів у ядрі, а різниця масового числа й кількості електронів повинна дорівнювати зарядові ядра. Ця модель не суперечила значенням ізотопних мас і зарядів, однак не погоджувалася зі значеннями магнітних моментів ядер, спінів й енергій зв'язку ядра.

         Краплинна модель ядра

Краплинна модель ядра була запропонована в 1936 році Бором і Френкелем. Вона ґрунтувалася на аналогії між поведінкою нуклонів у ядрі та поведінкою молекул у краплі рідини. В обох випадках сили, що діють між складовими частинками рідини (молекулами) і ядра (нуклонами), є короткодіючими, і їм властиве насичення. Для краплі рідини при постійних зовнішніх умовах характерною є постійна густина речовини. Ядра ж характеризуються практично постійною питомою енергією зв'язку і постійною густиною, що не залежить від числа нуклонів у ядрі. Нарешті, розмір краплі, як і розмір ядра, пропорційний до числа частинок. Однак ця модель представляє ядро як краплю електрично зарядженої нестисливої рідини з густиною, що дорівнює ядерній. Ця рідина підпорядковується законам квантової механіки. Краплинна модель ядра дозволила одержати напівемпіричну формулу для енергій зв'язку нуклонів у ядрі, пояснила механізм ядерних реакцій і особливо добре описала реакції розподілу ядра. Однак вона не пояснює підвищену стійкість ядер, що містять магічні числа протонів і нейтронів.

           Оболонкова модель ядра.

У 50-х роках двадцятого століття американець М. Гепперт-Майер і німець X. Йенсен виступили з оболонковою моделлю ядра. Відповідно до неї розподіл нуклонів у ядрі відбувається за дискретними енергетичними рівнями (оболонками), що заповнюються нуклонами відповідно до принципу Паулі. До того ж вона пов'язала заповнення цих рівнів зі стійкістю ядер. Вважається, що ядра з повністю заповненими оболонками є найбільш стійкими. Такі особливо стійкі (магічні) ядра справді існують. Це ядра, в яких число протонів або число нейтронів дорівнює одному з магічних чисел (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126).

Оболонкова модель ядра дозволила пояснити спіни і магнітні моменти ядер, різну стійкість атомних ядер, а також періодичність змін їхніх властивостей. Ця модель особливо добре описує легкі й середні ядра, а також ядра в основному (незбудженому) стані.

У міру подальшого нагромадження експериментальних даних про властивості атомних ядер з'являлися нові факти, які не завжди вкладалися в рамки описаних моделей. Так виникли узагальнена модель ядра (синтез краплинної й оболонкової моделей), оптична модель ядра (пояснює взаємодію ядер із частинками, що налітають) і багато інших.

Український фізик Іваненко і німецький фізик Гейзенберг 1932 року незалежно один від одного запропонували протонно-нейтронну модель ядра, згідно з якою ядро складається із протонів і нейтронів. Оскільки атом в цілому електронейтральний, а заряд протона дорівнює модулю заряду електрона, то число протонів у ядрі дорівнює числу електронів в атомній оболонці. Відповідно число протонів в ядрі дорівнює атомному номеру елемента в періодичній системі елементів Менделєєва. А кількість нейтронів дорівнює різниці між атомною масою ізотопу і значенням порядкового номера.

Суму числа протонів Z і числа нейтронів N називають масовим числом А; воно дорівнює:

                         A = Z + N.

Маси протонів і нейтронів приблизно однакові і дорівнюють 1 а. о. м. Маса електрона набагато менша від маси ядра. Визначити число протонів і нейтронів в ядрі атома дуже просто. Наприклад:

Усі хімічні елементи, які знаходяться в одному рядку таблиці елементів Менделєєва, мають однакові хімічні властивості, але фізичні властивості їх трохи відрізняються. Такі елементи називаються **ізотопами**. Ізотопи мають ядра атомів з одним і тим самим значенням Z, але різними кількостями N. Натепер відомо ізотопи всіх хімічних елементів. Наприклад, водень має три ізотопи:

 - водень звичайний - основний ізотоп стабільний.

 - дейтерій (тяжкий водень); входить як домішка до природного водню її вміст становить (1/4500 частину).

 - надтяжкий водень - тритій; отримують штучним шляхом, β - радіоактивний.

                Ядерні сили

 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:



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.

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 Еи прямо пропорційна поверхні S краплини. Енергія кулонівської взаємодії Е прямо пропорційна кількості протонів у ядрі Z або об’єму краплини V. Нехай радіус краплини г. Тоді ці дві енергії можна подати у вигляді:



Зрозуміло, що зі збільшенням г кулонівська енергія стає більшою за ядерну енергію і нарешті, за певних (великих) масових чисел А, 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.

Що таке енергія зв'язку атомного ядра

Щоб краще розібратися в енергетиці атомного ядра, на хвилинку 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 (£,„):



де



маса всіх нуклонів, які входять до складу ядра;

тя — маса ядра; с — швидкість світла у вакуумі. Величина



отримала назву дефект мас.

Отже, можемо записати:



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



Як одержати ядерну енергію: синтез легких і поділ важких ядер

Фізичну величину f, яка чисельно дорівнює відношенню енергії зв'язку е ядра до масового числа А цього ядра, називають питомою енергією зв'язку атомного ядра:



Графік залежності f(A) (рис. 54.1) має характерний вигляд: крива

зростає від нуля, коли А = 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 різкі способи для виділення енергії. Пертий 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.

Учимося розв'язувати задачі

Задача. Обчисліть питому енергію зв’язку нуклонів у ядрі ізотопу Гелію



Маса ядра Гелію 4,001 51 а. о. м., маса вільного протона 1,00728 а. о. м., маса вільного нейтрона 1,00866 а. о. м.



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



Енергію зв’язку можна визначити за дефектом маси



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

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



Використовуючи перевідний коефіцієнт k, знайдемо енергію зв’язку:



Відповідь: питома енергія зв’язку нуклонів у ядрі ізотопу Гелію



Навіщо потрібна високотемпературна плазма

Інший процес видобутку ядерної енергії відбувається за рахунок злиття легких ядер. Цей процес одержав назву «термоядерний синтез». Термоядерним синтезом називають процес множинного злиття легких ядер, яке відбувається за дуже високих (~109 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 Am. Дефект мас визначає енергію зв’язку: £зв = Атс2

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 (~ 109 К) температур.

Дом.завдання:

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? Άτ 8. Який процес називають термоядерним синтезом?

Вправа

1. Знайдіть дефект мас ядра Нітрогену 

2. Для ядра якого елемента енергія зв'язку дорівнює нулю?

3. Яка питома енергія зв'язку ядра 

4. Яку енергію треба витратити, щоб розділити ядро атома Літію на протони

та нейтрони, що його складають?

5. Яку кількість енергії можна отримати від ділення 1 г Урану 

якщо в ході кожного поділу виділяється енергія, що дорівнює приблизно 200 МеВ?