

Лекція 3

Тема. Основи загальної радіохімії: ядерні реакції. Поділ важких ядер.

Мета. Ознайомити студентів з ядерними реакціями (ланцюговими керованими та некерованими) та умовами їх перебігу; розглянути стадії поділу важких ядер.

Вступ.

У 1939 році було виявлено, що ядра урану-235 здатні не лише до спонтанного поділу (на два легших ядра) з виділенням ~ 200 MeV енергії та випромінюванням двох-трьох нейтронів, але й до вимушеного поділу, що ініціюється нейтронами. Враховуючи, що в результаті такого поділу теж випромінюються нейтрони, які можуть викликати нові реакції вимушеного поділу сусідніх ядер урану, стала очевидною можливість ланцюгової ядерної реакції.

План.

1. Ядерні реакції. Відмінність ядерних реакцій від хімічних. Умови, необхідні для протікання ядерних реакцій.
2. Поділ важких ядер.
3. Ланцюгові ядерні реакції, поняття про критичну масу.

Зміст лекції

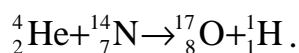
1. Ядерні реакції. Відмінність ядерних реакцій від хімічних. Умови, необхідні для протікання ядерних реакцій.

Ядерними реакціями називають перетворення атомних ядер внаслідок їх взаємодії з елементарними частинками та між собою.

Ядерні реакції підпорядковуються таким п'яти законам:

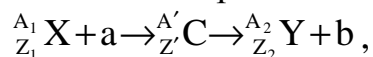
- 1) збереження заряду – збереження числа протонів;
- 2) збереження маси – збереження числа нуклонів;
- 3) збереження енергії;
- 4) збереження імпульсу;
- 5) збереження моменту імпульсу.

Вперше ядерну реакцію здійснив у 1919 році Е. Резерфорд, діючи α -частинками з енергією біля 7,5 MeV на ядра нітрогену ${}^{14}_7\text{N}$:



У основі переважної більшості ядерних реакцій є зіткнення частинок-снарядів (до яких відносяться нейтрони, α -частинки, протони, дейтрони) з ядрами-мішенями. Частинка-снаряд повинна мати достатню енергію для подолання значного потенціального бар'єру кулонівських сил відштовхування ядра-мішені. Проникнувши в ядро-мішень, частинка-снаряд «застрягає» в ньому, передаючи свою енергію значному числу нуклонів у радіусі дії ядерних сил. Якщо ядро-мішень, одержавши таку енергію, стає збудженим протягом часу $\tau_1 \approx 10^{-14}$ с, то такі ядерні реакції відбуваються через *складене* або *компаунд-ядро*.

Складене, або компаунд-ядро через час $\tau_1 \approx 10^{-14}$ с переходить у нормальний стан, випромінюючи іншу частинку. Схематично ядерні перетворення через проміжне складене ядро виглядають так:



де ${}_{Z_1}^{A_1}X$ – вихідне ядро - мішень;

a – частинка - снаряд;

${}_{Z'}^{A'}C$ – складене або компаунд-ядро;

b – частинка, яка вилітає з ядра внаслідок реакції;

${}_{Z_2}^{A_2}Y$ – ядро, яке є продуктом ядерної реакції.

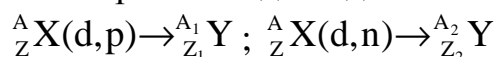
Ядерні реакції можуть бути ендотермічними (з поглинанням енергії) і екзотермічними (з виділенням енергії).

Найменша енергія частинки-снаряду за якої можлива ендотермічна ядерна реакція, називається **енергетичним порогом ядерної реакції**.

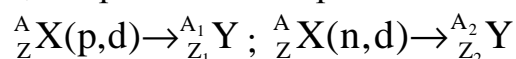
Екзотермічні реакції не мають енергетичного порога і можуть відбуватись за будь-яких значень енергії частинок-снарядів. Однак імовірність ядерних перетворень зростає з ростом енергії частинок-снарядів. У ядерній реакції, яку спостерігав Резерфорд у 1919 р., вперше виявлено вільні протони, які до цього часу ще не реєструвались. Ця ядерна реакція відбувається протягом дуже малого часу $\tau \approx 10^{-23}$ с, необхідного для перелітання нуклону зі швидкістю, близькою до швидкості світла, через ядро. Такі реакції називають *прямими* ядерними реакціями.

Серед ядерних реакцій, які відбуваються через складене ядро слід відмітити *ядерні реакції відриву* і *ядерні реакції захоплення*.

У ядерних реакціях відриву частинки – снаряди (дейтрони – ядра атома дейтерію (D+), ізотопу гідрогену з масовим числом 2) віддають ядру - мішені або один протон, або один нейтрон за відповідними схемами:



Під час ядерних реакцій захоплення ядро – мішень, поглинувши один протон або один нейтрон, випромінює дейтрон:



Прямі ядерні реакції, а також ті, які відбуваються через складене ядро, потребують досить великих енергій налітаючих частинок.

2. Поділ важких ядер.

Взаємодія ядер важких елементів (уран, торій) з нейтронами може привести до поділу цих ядер на приблизно рівні уламки. Ядерні реакції такого типу називають реакціями поділу.

Механізм поділу важкого ядра після його взаємодії з нейтроном можна пояснити, виходячи з «краплинної» моделі будови ядра (рис. 3.1), враховуючи дію ядерних та кулонівських сил. Припустимо, що ядро поглинуло один нейтрон. Таке ядро, перебуваючи у збудженому стані, здійснює відповідну пульсацію, довільно змінюючи свою форму. У цьому випадку під дією великої кількості різноманітних пульсацій, форма ядра може стати еліпсоїдною (рис. 3.1). Після цього завдяки дії поверхневих ядерних сил, а також кулонівських

сил відштовхування є велика ймовірність, що еліпсоїдне ядро стане гантелеподібним і після цього буде розірване на дві частини (рис. 3.1).

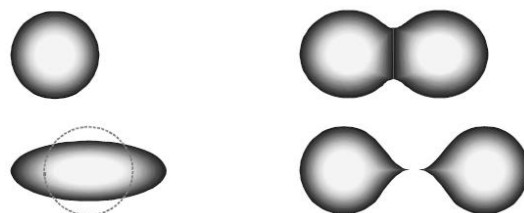


Рис. 3.1. Стадії поділу ядра.

У середній частині «гантелі» (рис. 3.1) буде підвищена концентрація нейтронів. Ці частинки перебувають під дією кулонівських сил, а тому, як правило, 2-3 з них не встигають потрапити у відповідні уламки поділу. Отже, реакція поділу починається з поглинання важким ядром одного теплового нейтрона, а закінчується розривом його на два приблизно рівні уламки з виділенням двох-трьох теплових нейтронів.

Після того як Е. Фермі дослідив, що під час опромінювання урану нейтронами утворюється цілий ряд радіоактивних речовин, які відрізняються між собою періодами напіврозпаду, були зроблені багаточисельні спроби хімічного виділення цих речовин та їх хімічної ідентифікації.

У результаті експериментів О. Гана і Г. Штрасмана стало зрозуміло, що внаслідок приєднання нейтрону до ядра урану з масою 235 або 238 одиниць, виникає уламок у вигляді ядра атома барію, маса якого близька до 140. Можна було очікувати й іншого уламка, який ніби доповнював би перший до маси і заряду ядра урану. Наступні хімічні дослідження показали, що у випадку поділу ядра урану утворюються уламки, що належать радіоактивним ізотопам елементів від Zn до Eu включно.

Таким чином, процес поділу носить статистичний характер (рис. 3.2) – ядро ділиться по-різному, і знайдений О. Ганом і Г.Штрасманом радіоактивний ізотоп барію є лише одним з багатьох (більш 300) можливих продуктів поділу.

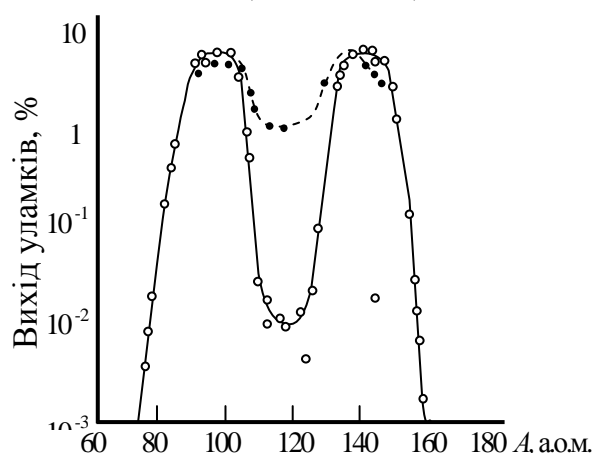


Рис. 3.2. Розподіл уламків поділу ядер урану в залежності від масових чисел: суцільна лінія відповідає поділу ядер, опромінених повільними нейтронами; крижована – нейтронами з енергією 14 MeV.

У стані рівноваги із усіх продуктів поділу приблизно 25 % – рідкоземельні елементи, 15 % – цирконій, 12 % – молібден, 6,5 % – цезій, 16 % – благородні гази (ксенон і криптон).

3. Ланцюгові ядерні реакції, поняття про критичну масу.

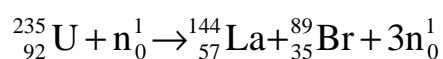
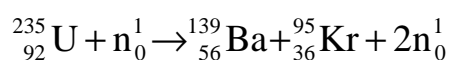
Вперше думка про можливість здійснення ланцюгових ядерних реакцій була висунута Ф.Жоліо-Кюрі в 1934 р. Після відкриття поділу атомних ядер Е. Фермі, У. Зінн, Л. Сцилард (США) і Г.Н. Флеров (СРСР) показали, що під час поділу ядра, крім уламків-ядер, вилітають 2-3 вільних нейтрони:



де А і В – уламки поділу з масовими числами А від 90 до 150,

n – число вторинних нейтронів.

Ці нейтрони можуть ініціювати подальший поділ ядер урану з утворенням нових нейтронів і тим самим реалізувати ланцюгову реакцію. Наприклад:



Ядерні ланцюгові реакції – це ядерні реакції, в яких частинки, що викликають їх, утворюються як продукти цих реакцій (рис. 3.3).

Характер ядерних ланцюгових реакцій під дією нейтронів залежить від їх енергії.

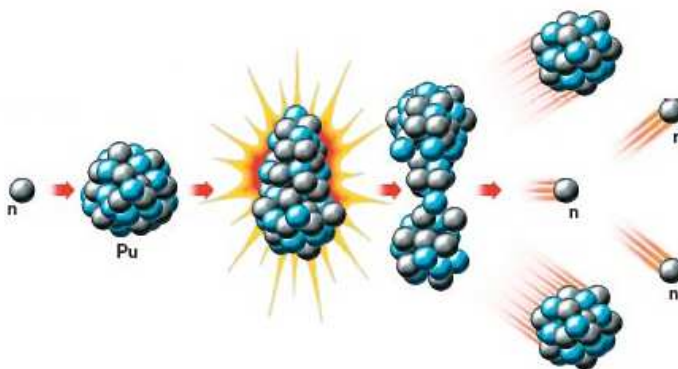


Рис. 3.3. Схема ланцюгової реакції.

Сповільнені нейтрони є ефективнішими для збудження атомних ядер, а отже і початку реакції, оскільки вони відносно довго можуть знаходитися поблизу ядра, і завдяки цьому ймовірність захоплення нейтрона ядром є значно вищою, ніж для швидких нейтронів. Сповільнити нейтрони можна, пропускаючи їх через речовину, що містить водень – парафін, важку воду і т.д.

Коефіцієнт використання теплових нейтронів. Коефіцієнт розмноження. Для характеристики ланцюгової реакції вводиться коефіцієнт використання теплових нейтронів θ , що показує, яке відносне число теплових нейтронів поглинається ядрами ${}_{92}^{235}\text{U}$. Оскільки деяке число нейтронів губиться в сповільнювачі, то $\theta < 1$. Розмноження на теплових нейтронах характеризується коефіцієнтом розмноження k, що уявляє відношення числа нейтронів у другому поколінні (вторинних) до числа нейтронів у першому поколінні (первинних) з обліком всіх можливих втрат нейтронів.

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}, \quad (3.1)$$

де N_i – число вторинних нейтронів;

N_{i-1} – число первинних нейтронів.

Умови ланцюгової реакції.

За умови $(k-1) > 1$ ($k > 1$) число нейтронів n буде зростати в часі t за законом (3.2).

$$N = N_0 \exp\left(\frac{k-1}{\tau} t\right) \quad (3.2)$$

де N_0 – число актів розподілу в початковий момент реакції;

N – число активних нейтронів у момент часу t ;

τ – середній проміжок часу між двома послідовними актами розподілу ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$.

У випадку достатньо великих значень $(k-1)$ (або $k \gg 1$) реакція перестає бути керованою і може призвести до ядерного вибуху.

Якщо $k-1=0$ ($k=1$), то число поділів за одиницю часу є сталим ($N = N_0$) і реакція відбувається зі сталою інтенсивністю (самопідтримується).

Якщо $(k-1) < 0$, $k < 1$, $N < N_0$ число нейтронів зменшується в ході реакції; це загасаюча ланцюгова реакція.

Отже, щоб відбувався ланцюговий процес поділу атомних ядер коефіцієнт розмноження нейтронів k повинен бути більшим 1. Тоді реакція буде наростати в геометричній прогресії:

$$k = \frac{N + \Delta N}{N} > 1, \quad (3.3)$$

де N – кількість нейтронів у першому поколінні;

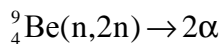
$N + \Delta N$ – кількість нейтронів у другому поколінні.

Практичне здійснення ядерної ланцюгової реакції є складним завданням. Нейтрон, ще до того як сповільнитись, може бути захоплений ядром і поділу не буде, а випроміниться γ -квант. До того ж, у зразку малих розмірів більшість нейтронів пролітає крізь зразок, не потрапивши в жодне ядро. Мінімальна маса урану, в якій може виникнути ланцюгова реакція, називається **критичною масою**. Критична маса залежить від чистоти і форми зразка, а також залежить від способу його розміщення в системі.

Для збільшення ймовірності протікання ланцюгової реакції можливі кілька способів розміщення маси речовини, що ділиться, за допомогою яких вдається зменшити критичну масу.

1. Використання відбивачів. Відбивач – це речовина, що відбиває вилітаючі за межі критичної маси нейтрони. Термін «відбивач» не цілком точний, оскільки в природі не існує матеріалу, здатного повністю відбивати нейтрони у зворотному напрямку. Механізм роботи відбивача полягає в тому, щоб нейтрони, що рухаються безладно випадковими траєкторіями, здійснювали зворотне розсіювання від об'єму відбивача. Тому ядра відбивачів не повинні захоплювати й поглинати нейтрони. Таким чином, у результаті багаторазових зіткнень із ядрами речовини-відбивача деяке число нейтронів буде розсіюватися у зворотному напрямку. Відбивачами є графіт, берилій, вода, вуглеводні.

2. *Використання сповільнювачів.* Сповільнювач уявляє собою матеріал, що сповільнює швидкі нейтрони (миттєві нейтрони), що виникають під час поділу $^{235}_{92}\text{U}$. У результаті зіткнень швидких нейтронів з ядрами сповільнювача швидкі нейтрони в кожному акті зіткнення втрачають енергію, яка після багаторазових зіткнень знижується до теплової. До сповільнювачів відносяться графіт, берилій, вода, вуглеводні, причому берилій є одним із найкращих сповільнювачів. У результаті опромінення берилію нейтронами відбувається наступна ядерна реакція:



Сповільнювачем може бути також й $^{238}_{92}\text{U}$ для тих швидких нейтронів, енергія яких менше 1,4 МеВ. Тоді під час зіткнення швидкого нейтрона з ядром $^{238}_{92}\text{U}$ поділу ядра не відбувається, виникає збуджене складене ядро.

3. *Ретельна сепарація* – ізотопна очистка радіоактивного матеріалу (з метою зниження захоплення нейтронів ядрами речовини, що не ділиться).

Для керування ланцюговою реакцією використовуються поглиначі. Їх виготовляють у вигляді стержнів, які в процесі вигорання ядерної речовини поступово витягують із активної зони. Із природних елементів з більшим перерізом поглинання теплових нейтронів широко застосовуються бор $^{11}_5\text{B}$ і кадмій $^{112}_{48}\text{Cd}$, як у чистому виді, так й у різних сполуках і стопах, а також гафній $^{178}_{72}\text{Hf}$.

Зі зменшенням розмірів активної зони збільшується число нейтронів, що виходять за її межі, при цьому зменшується можливість подальшого розвитку ланцюгової реакції. Число нейтронів, що виходять за межі активної зони, пропорційне до площі поверхні, а число знову утворених нейтронів пропорційне об'єму речовини, що ділиться. Оцінити відносне число вихідних з ланцюгової реакції нейтронів внаслідок витoku можна зі співвідношення:

$$\frac{S}{V} = \frac{4\pi R^2}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3}{R}, \quad (3.4)$$

де S – площа поверхні активної зони, V – об'єм активної зони.

Отже, зі зменшенням радіуса активної зони R збільшується число нейтронів, що вилітають із активної зони. Мінімальні розміри активної зони, за яких стає можливим перебіг ланцюгової ядерної реакції, називаються **критичними**.

Таким чином, необхідними умовами для реалізації ланцюгової реакції і отримання енергії є:

- хімічно та ізотопно чистий вихідний матеріал (тому що домішки поглинають нейтрони);
- маса матеріалу повинна бути більша за критичну;
- необхідно утримувати певний час критичну масу – для підтримки і розвитку реакції.

Коефіцієнт розмноження нейтронів залежить від кількості урану, а також розмірів активної зони. Для одержання керованої ланцюгової реакції необхідно мати коефіцієнт розмноження $k \approx 1$. У цьому випадку число активних нейтронів буде змінюватися настільки мало, що таким потоком нейтронів легко керувати.

Для цього в активну зону вводять спеціальні стержні – сповільнювачі ядерної реакції. Уводячи й виводячи з активної зони такі стержні, можна керувати ходом ланцюгової реакції (керована реакція). Залежно від величини коефіцієнта розмноження k можна одержати три режими роботи: $k = 1$ – критичний режим, $k > 1$ – надкритичний режим, $k < 1$ – підкритичний режим.

Висновки.

Ядерними реакціями називають перетворення атомних ядер внаслідок їх взаємодії з елементарними частинками та між собою. Ядерні реакції підпорядковуються таким п'яти законам: збереження заряду – збереження числа протонів; збереження маси – збереження числа нуклонів; збереження енергії; збереження імпульсу; збереження моменту імпульсу.

Ядерні ланцюгові реакції – це ядерні реакції, в яких частинки, що викликають їх, утворюються як продукти цих реакцій. Необхідними умовами для реалізації ланцюгової реакції і отримання енергії є: хімічно та ізотопно чистий вихідний матеріал (тому що домішки поглинають нейтрони); маса матеріалу повинна бути більша за критичну; необхідно утримувати певний час критичну масу – для підтримки і розвитку реакції.

Література.

1. Мідак Л.Я., Кравець І.В. Основи радіохімії. – Івано-Франківськ: пп Голіней, 2013. – 160 с.
2. Краткий курс радиохимии/ Под. ред. А.В. Николаева. - М., 1969.
3. Несмеянов В.Н. Радиохимия. - 2изд. - М., 1978.
4. Нефедов В.Д., Текстер Е.Н., Торолова М.А. Радиохимия. - М., 1987.
5. Несмеянов А.Н. Прошлое и настоящее радиохимии - Л., «Химия». - 1985.
6. Руководство к практическим занятиям по радиохимии/ Под ред. А.Н. Несмеянова. - М., 1980.

Запитання для самоперевірки.

1. Які реакції називають ядерними. Чим ядерні реакції відрізняються від хімічних?
2. Вкажіть основні стадії поділу ядра.
3. Дайте визначення ланцюговій ядерній реакції. Приведіть приклади.
4. Що таке коефіцієнт розмноження нейтронів? Які фактори на нього впливають?
5. Вкажіть необхідні умови для реалізації ланцюгової реакції і отримання енергії.
6. Приведіть приклади застосування керованої та некерованої ланцюгової реакції.