



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. Каразіна
Кафедра прикладної хімії

Основи радіохімії та радіоекології

Тема 7

Ядерні реакції

доц. А.П. Краснопьорова
2023

ОТРИМАННЯ та утворення радіонуклідів. ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ.

Відомо кілька шляхів утворення та отримання радіоактивних нуклідів:

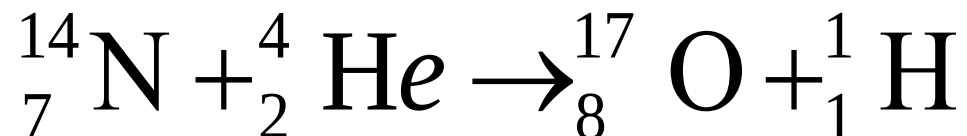
- 1. Ядерні реакції в природі;**
- 2. Ядерні реакції в різних установках з подальшим вилученням ізотопів з опромінених мішеней;**
- 3. Ядерний вибух;**
- 4. Переробка руд урану та торію, в яких внаслідок радіоактивного розпаду U-238 та Th-232 утворюються радіоактивні ізотопи елементів з порядковими номерами від 81 до 91.**

Ядерні реакції, визначення

Фізичним процесом, що лежить в основі утворення та отримання радіонуклідів, є ядерні реакції

Ядерною реакцією називається процес взаємодії ядра з іншим ядром, елементарною частинкою або фотоном, у результаті якого утворюється одне або кілька ядер та елементарних частинок.

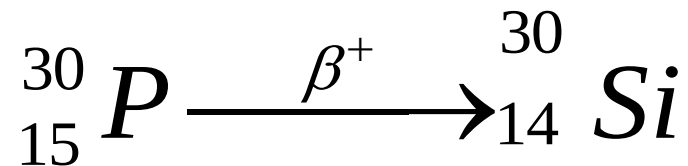
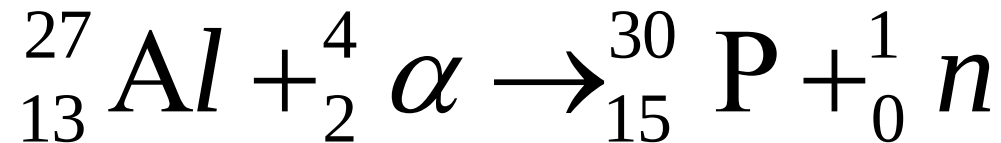
Першу ядерну реакцію здійснив Еге. Резерфорд 1919г.



Штучна радіоактивність

Детальне вивчення ядерних реакцій та отримання нових радіоактивних елементів та ізотопів стало можливим після відкриття у 1934 р.

Ірен та Фредеріком Жоліо-Кюрі штучної радіоактивності:



Ядерні реакції: визначення

Більшість ядерних реакцій – це реакції між ядром та легкою частинкою (протон, нейтрон, дейтрон, α -частка, електрон, мезон, фотон), що призводять до утворення нового ядра та однієї або кількох елементарних частинок.

α

Винятком із цього правила є реакції поділу та реакції, що протікають під дією прискорених іонів: Li, Be, B, N, C, Ne.

Для синтезу нових трансактиноїдних елементів як бомбардуючі частинки використовуються – Ca, Cr, Zn та ін.

Механізм ядерних реакцій.

Форма запису

Загалом ядерну реакцію записують:



A – ядро мішень; **a** – бомбардуюча частка; **B** – ядро, що утворилося; **b** – частинка, що утворилася.

Часто користуються скороченим записом ядерних реакцій, при якому між символами вихідного та кінцевого ядер ставлять у круглих дужках символи бомбардуючої та вилітаючої частинки:



Механізм ядерних реакцій.

Основні етапи протікання ядерних реакцій

Відповідно до існуючих уявлень ядерні реакції протікають у три етапи.

1. Перший етап полягає у захопленні частинки ядром мішені та утворенням збудженого складового ядра (компаунд-ядра), при цьому частинки втрачають більшу частину своєї енергії:



2. Другий етап включає процес перерозподілу енергії частинок всередині компаунд-ядра, що протікає в часі.

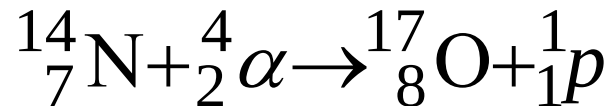
3. Третій етап – миттєвий розпад компаунд-ядра із заснуванням кінцевих продуктів.

Процес зіткнення бомбардуючої частки з ядром триває $\sim 10^{-21}$ с, а компаунд-ядро до свого розпаду існує значно довше ($\sim 10^{-12}$ с).

Основні закони для ядерних реакцій

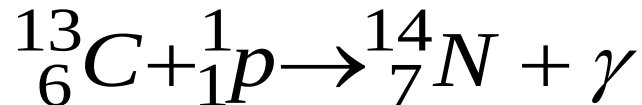
Ядерні реакції у багатьох відношеннях подібні до хімічних реакцій. Як і хімічних реакцій, для ядерних реакцій справедливі основні закони фізики

1. Закон збереження електричного заряду: Сума електричних зарядів ядер та частинок, що вступають у реакцію, дорівнює сумі зарядів ядер та частинок, що утворюються в результаті реакції». При записі ядерної реакції у розгорнутій формі, суми нижніх індексів до і після реакції однакові



2. Закон збереження числа нуклонів:

«Загальна кількість нуклонів у ядрах і частках, що вступають у реакцію, дорівнює кількості нуклонів у ядрах та частках, що виходять при реакції, тобто. сума верхніх індексів до та після реакції однакова



3. Закон збереження енергії "Повна енергія всіх ядер і частинок, що вступають у реакцію, дорівнює повній енергії всіх ядер і частинок, що виходять в результаті реакції".

$$\Delta E = c^2 (\sum m_1 - \sum m_2) \text{MeV}$$

Порівняння ядерних і хімічних реакцій

1. На відміну від хімічних реакцій, у яких вихідні речовини, взяті в еквівалентних кількостях, реагують майже націло, ядерну реакцію викликає лише невелика частка частинок із загального потоку, що пронизує бомбардовану мішень.

У хімічних реакціях розглядаються перетворення вагових кількостей речовин, у ядерних – окремих атомів.

Тому ядерні реакції завжди відносять до 1 атома, а хімічні до 1 молю речовини.

2. Хімічні реакції не призводять до перетворення елементів. Хімічні реакції супроводжуються зміною зв'язків між атомами.

У ядерних реакціях утворюються нові нукліди, які можуть належати до різних елементів.

3. У хімічних реакціях виділяється значно менше енергії, ніж у ядерних реакціях. Наприклад, при поділі 1 г U-235 виділяється $8,4 \cdot 10^7$ кДж у порівнянні з 33,9 кДж, які виділяються при згорянні 1 г вугілля.

Основні характеристики ядерних реакцій

1. Вихід ядерної реакції. Виход ядерної реакції-це відношення числа частинок, які приймають у ядерному перетворенні (N_r), до загального числа бомбардируючих частинок (N_0):

$$Y = \frac{N_r}{N_0} \quad 1$$

2. Ефективний перетин ядерної реакції :

Ефективний переріз ядерної реакції - це площа поперечного перерізу ядра, в яке повинна "потрапити" інша частка або ядро, щоб відбулася їхня взаємодія.

$$N_r = N_0 (1 - e^{-\sigma n_0 x}) \quad 2$$

де N_r – число частинок, які приймають участь у ядерній реакції; N_0 – число частинок, які падають на мішень; σ – ефективний перетин ядерної реакції; n_0 – число ядер мишені в 1м^3 ; x – товщина мишені в м.

Ефективний переріз ядерної реакції

Функцію $e^{-\sigma n x}$ можна розкласти в ряд:

$$e^{-\sigma n_0 x} = 1 - \frac{n_0 \sigma x}{1} + \frac{(n_0 \sigma x)^2}{2!} \quad 3$$

Якщо пучок нейтронів падає на тонку мішень можна обмежитися лише першими двома членами низки. Тоді рівняння 2 можна 2 записати:

$$N_r = N_0 n_0 \sigma x \quad 4$$

відкіля:

$$\sigma = \frac{N_r}{N_0 n_0 x} \quad 5$$

$$1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$$

Таблиця. Основні типи ядерних реакцій

Частинки, які визивають ядерні реакції	Частинки, які одержуються в результаті ядерних реакцій					
	α	t	d	p	n	γ
α	(α, α)	(α, t)	(α, d)	(α, p)	(α, n)	(α, γ)
t	(t, α)	(t, t)	(t, d)	(t, p)	(t, n)	(t, γ)
d	(d, α)	(d, t)	(d, d)	(d, p)	(d, n)	(d, γ)
p	(p, α)	(p, t)	(p, d)	(p, p)	(p, n)	(p, γ)
n	(n, α)	(n, t)	(n, d)	(n, p)	(n, n)	(n, γ)
γ	(γ, α)	(γ, t)	(γ, d)	(γ, p)	(γ, n)	(γ, γ)

1. Ядерні реакції в природі

За сучасними уявленнями речовина планет утворилася з плазми Зірки (в основному водневої) , розігрітої до десятків і сотень мільйонів градусів.

За таких температур протікають термоядерні реакції

Термоядерні реакції – ядерні реакції між легкими атомними ядрами, що протікають за дуже високих температур (порядку 10^7K і вище).

Високі температури, необхідні для подолання електростатичного бар'єру, зумовленого взаємним відштовхуванням ядер.

Тому термоядерні реакції у природних умовах протікають лише надрах Зірок.

1.1. Термоядерні реакції в Зірках. Протон – протонний цикл

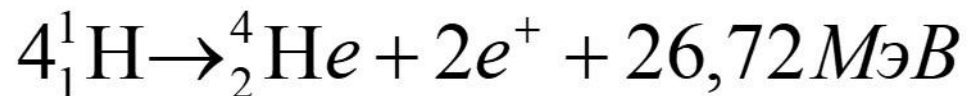
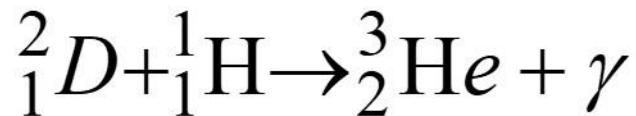
У 1935р. Х. А. Бете висунув гіпотезу, що джерелом сонячної енергії може бути термоядерна реакція перетворення водню на гелій.

Х.А. Бете і К. Вайцеккер показали, що можливі дві різні послідовності реакцій перетворення 4-х ядер водню на ядро гелію.

Ці реакції класифікують так: протон - протонний цикл, в якому водень перетворюється безпосередньо на гелій Протон-протонний цикл протікає у Зірках, що мають масу, порівняну з масою Сонця; вуглецево-азотно-кисневий цикл (CNO-цикл), в якому як каталізатор беруть участь ядра С, N і О.



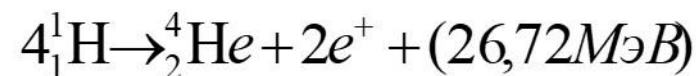
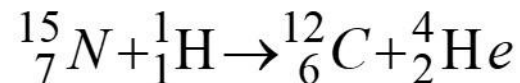
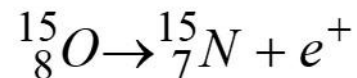
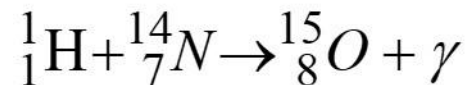
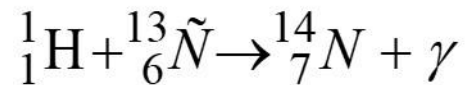
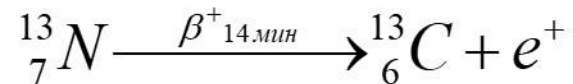
протон – протонний цикл:



1.2. Термоядерні реакції в Зірках

Вуглецево-азотний цикл (CNO-цикл)

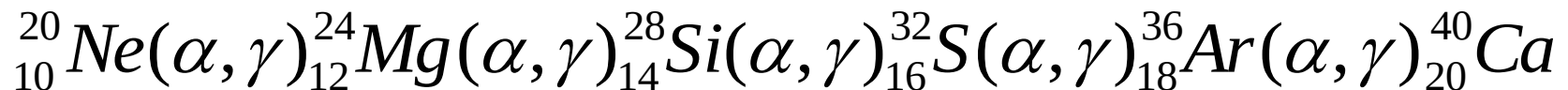
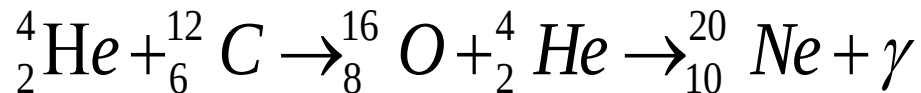
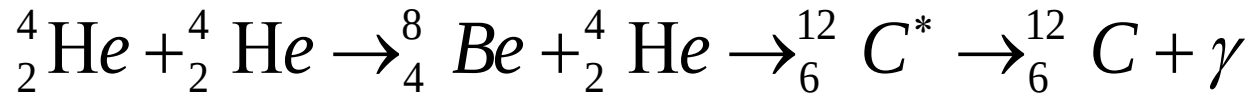
У потужніших зірках, які мають більш високу температуру, основним джерелом енергії є CNO-цикл.



1.3. Ядерні реакції у Зірках. α Проце (α, γ)

Після того, як у Зірці накопичується гелій, а температура в центральній частині Зірки, в якій міститься гелій, досягає 10^8K , включається нова ядерна реакція – горіння гелію. Це процес послідовного додавання α -частинок до ядра ^{20}Ne з утворенням ядер ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{32}S , ^{36}Ar , ^{40}Ca .

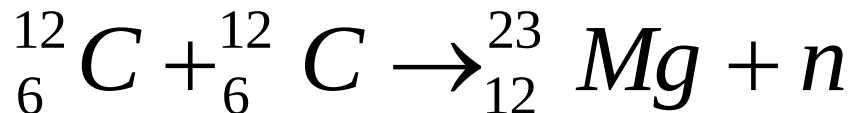
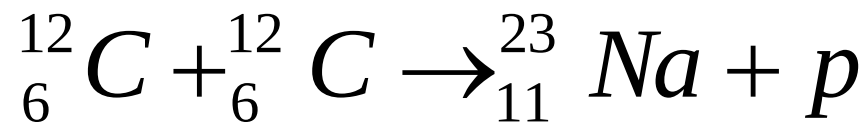
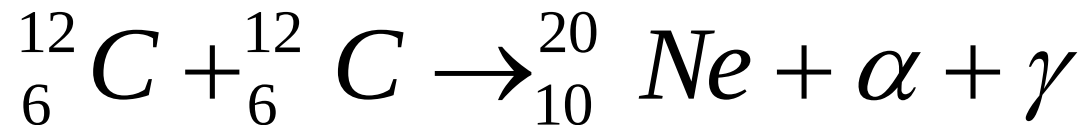
Проце (α, γ):



1.4. Ядерні реакції в Зірках. Горіння вуглецю

- Горіння вуглецю

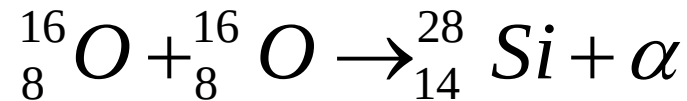
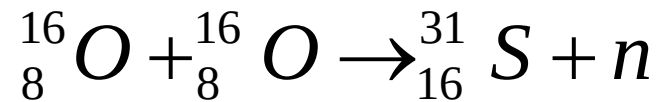
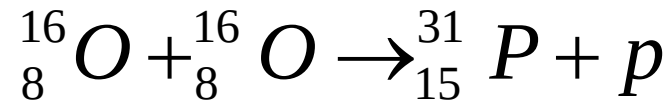
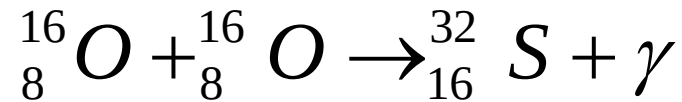
Горіння вуглецю починається у Зірках при температурі близько $8 \cdot 10^8 \text{K}$. Основні реакції горіння вуглецю такі:



1.5. Ядерні реакції у Зірках. Горіння кисню

- Горіння кисню

Наступна стадія – горіння кисню. Основні реакції горіння кисню:

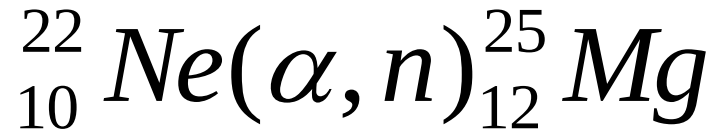
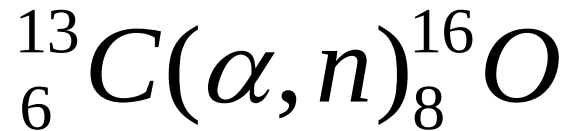


Протони, нейтрони, γ -кванти, що утворюються в кінцевому стані, швидко вступають у нові реакції, що значно розширює кількість можливих ядерних реакцій.

1.6. Ядерні реакції у Зірках.

Утворення нейтронів (α, n) та фотоядерні реакції

При зменшенні вмісту водню на передній план виступають реакції типу:



Додатковим джерелом нейтронів із щільністю 109–1011 н/см³ при $T \sim 8 \cdot 10^8 \text{K}$ можуть бути фотоядерні (фотонейтронні) реакції:



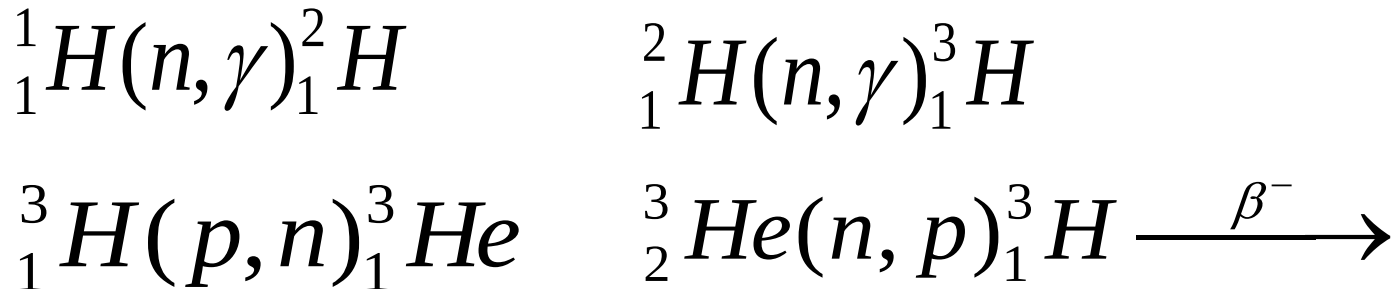
1.7. Утворення радіонуклідів у атмосфері Землі

В результаті впливу космічних випромінювань, що складаються з протонів (90%), ядер гелію та інших частинок, на компоненти газової суміші азот-кисень, відбувається розщеплення цих ядер і з'являються швидкі нейтрони.

Нейтрони діють на ядра атомів азоту, що приводить до утворення діоксида вуглецю :



В верхніх шарах атмосфери протікають також реакції, які приводять до утворення тритію:



1.8. Утворення радіонуклідів у земній корі

Згідно з сучасними даними всі елементи кінця Періодичної системи утворилися в результаті вибуху наднової і зіткнення нейтронних Зірок.

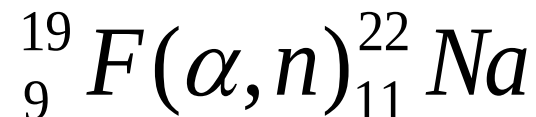
При охолодженні утворюються елементи, які мають такі великі періоди напіврозпаду, що зберігаються в природі з моменту утворення Сонячної системи, наприклад:

^{129}I ($1,6 \cdot 10^7 \text{p}$); ^{244}Pu ($8,2 \cdot 10^7 \text{p}$);

^{238}U ($7,1 \cdot 10^7 \text{p}$); ^{238}U ($4,5 \cdot 10^9 \text{p}$),

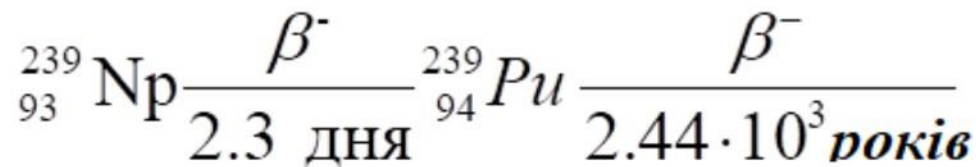
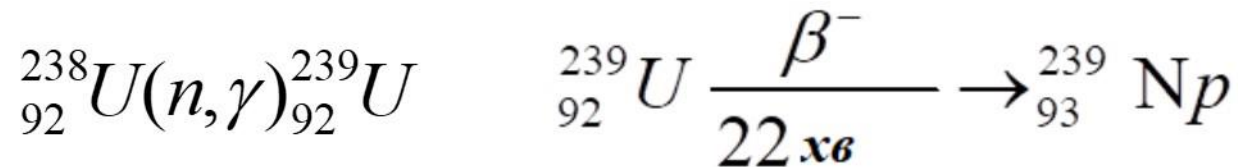
^{232}Th ($1,4 \cdot 10^{10} \text{p}$); ^{40}K ($1,3 \cdot 10^9 \text{p}$).

У земній корі під дією альфа-частинок, що утворюються в результаті α -розпаду урану та торію, відбувається ряд ядерних α , n):

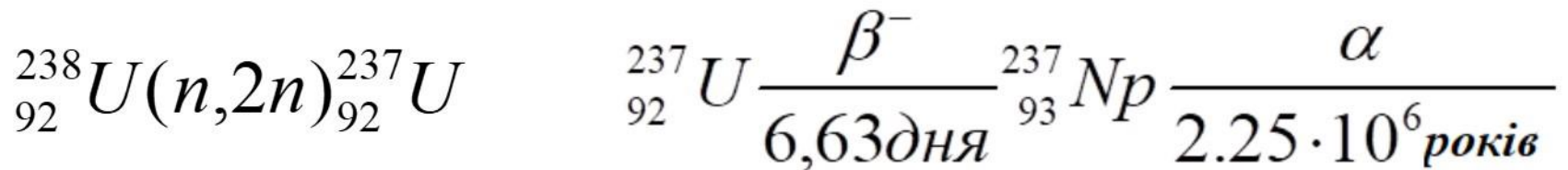


1.9 Утворення радіонуклідів у земній корі під дією нейтронів

При дії утворених нейтронів на ^{238}U відбувається утворення ^{239}Pu з періодом напіврозпаду $2,4 \cdot 10^4$ років:

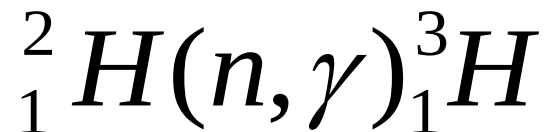
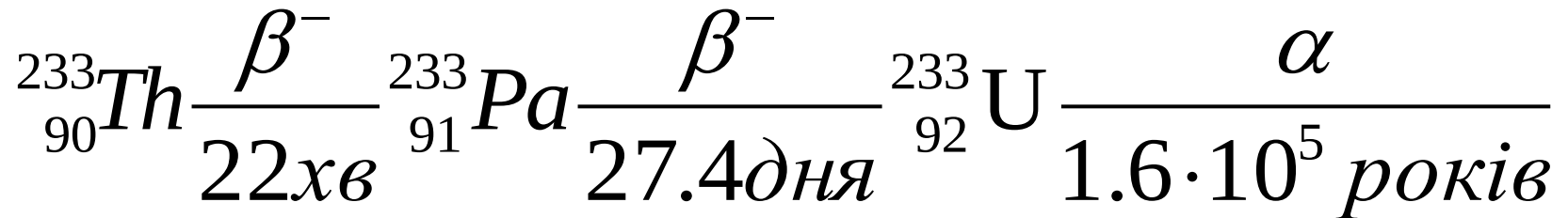
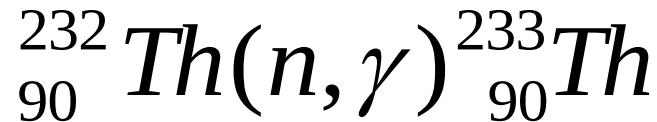


Взаємодія нейтронів з ядрами атомів ^{238}U приводить також до утворення довгоживучого ізотопу ^{237}Np з періодом напіврозпаду $2.25 \cdot 10^6$ років:



1.10. Утворення радіонуклідів у земній корі при взаємодії нейтронів з Th-232 та H-2

При дії нейтронів на $^{232}_{90}\text{Th}$ відбувається утворення $^{233}_{92}\text{U}$:



2. Одержання радіонуклідів в енергетичних установках

Незважаючи на те, що з моменту відкриття дотепер проведено понад десяток тисяч різних ядерних реакцій, всі вони можуть бути об'єднані у три групи:

- 1. Реакції, при яких заряд ядра не змінюється.**
- 2. Реакції примусого поділу.**
- 3. Реакції, у яких заряд ядра змінюється.**

Ядерний реактор

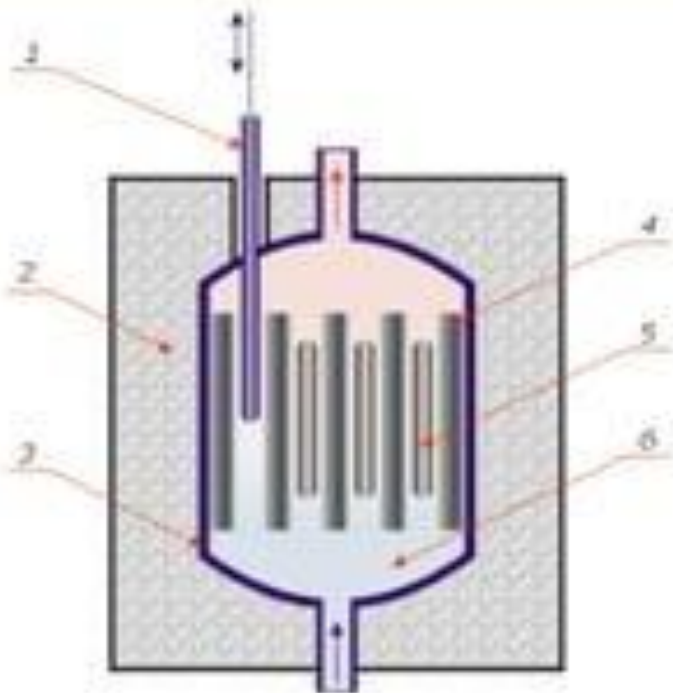
Одержання ізоотопів із застосуванням реакції (n, γ) та примусового поділу здійснюється тільки в ядерних реакторах.

Ядерним реактором називається пристрій, у якому за певних контрольованих умов відбувається регульована ядерна реакція.

За своїм призначенням ядерні реактори поділяють на:

- реактори для виробництва матеріалів, що розщеплюються (плутонія-239, урану-235 та ін.);
- реактори для виробництва радіоактивних ізоотопів;
- реактори для отримання ядерної енергії;
- реактори для науково-дослідних цілей.

Схематична будова ядерного реактора

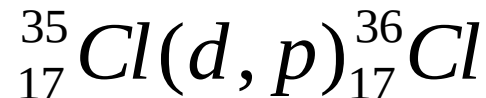


Схематична будова гетерогенного реактора на теплових нейтронах

- 1 — керуючий стержень;
- 2 — біологічний захист;
- 3 — теплоізоляція;
- 4 — сповільнювач;
- 5 — ядерне паливо;
- 6 — теплоносій.

2.1. Реакції, при яких заряд ядра не змінюється

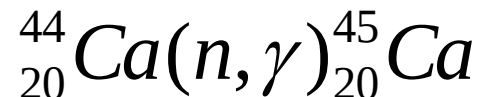
$(n, \gamma), (\gamma, n), (p, d), (n, 2n), (d, p)$ та інш. Наприклад:



Найбільш важливими з перерахованих реакцій є реакції під впливом нейтронів.

Найпоширенішими є реакції радіаційного захоплення (n, γ) , які особливо ефективно протікають на повільних та теплових нейтронах.

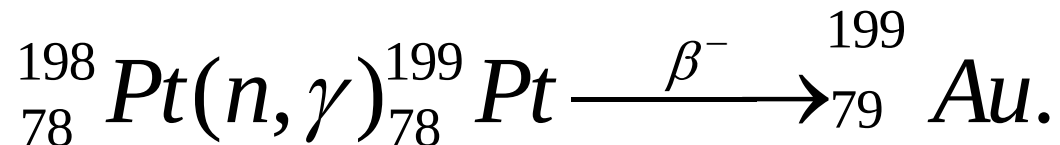
Ці реакції дозволяють отримати радіоактивні ізотопи багатьох елементів Періодичної системи Д.І. Менделєєва, наприклад:



Відділення радіоактивного ізотопу від матеріалу мішені

Відділення можливе, якщо материнський та дочірні ізотопи після ядерного перетворення знаходяться у різних фазах (материнський осаджений на іоніті у вигляді комплексу, а дочірній з'явиться в іонному стані та легко змивається з колонки).

Відділення можливе, якщо радіоактивні ізотопи, що утворилися, в результаті бета-розпаду перетворюються на радіоактивні ізотопи наступного елемента за елементом мішені:



2.2. Реакції вимушеного поділу важких ядер (n, f). Ланцюгові ядерні реакції

Перша реакція вимушеного поділу була здійснена радіохіміками Отто Ганом, Фріцем Штрассманом та фізиком Лізою Мейтнер у 1939 р. шляхом бомбардування тепловими нейтронами природного урану.

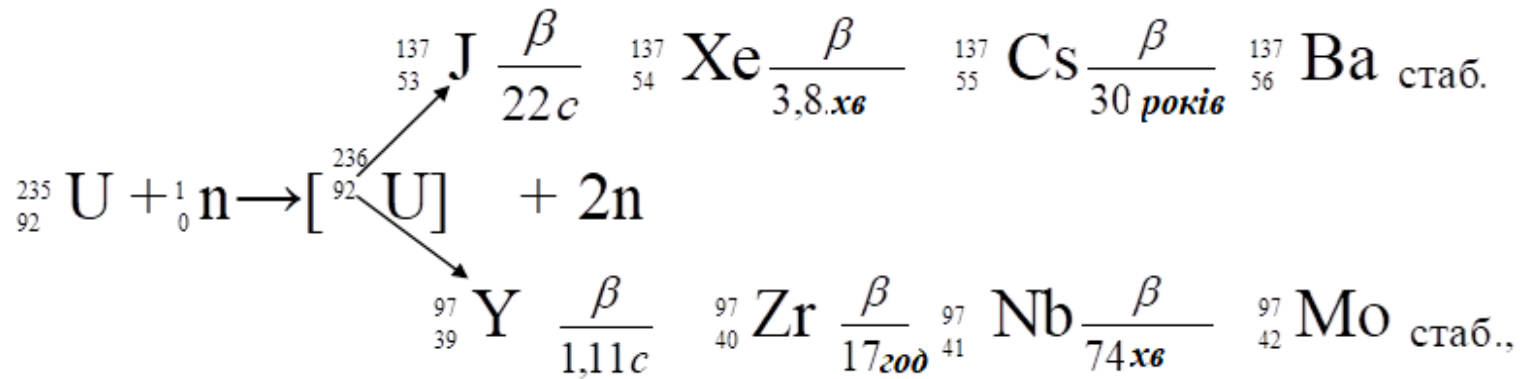
Дослідження продуктів поділу урану показало, що брав участь у поділі лише легший із двох природних ізотопів урану U-235.

Реакції вимушеного поділу важких ядер позначаються (n, f).

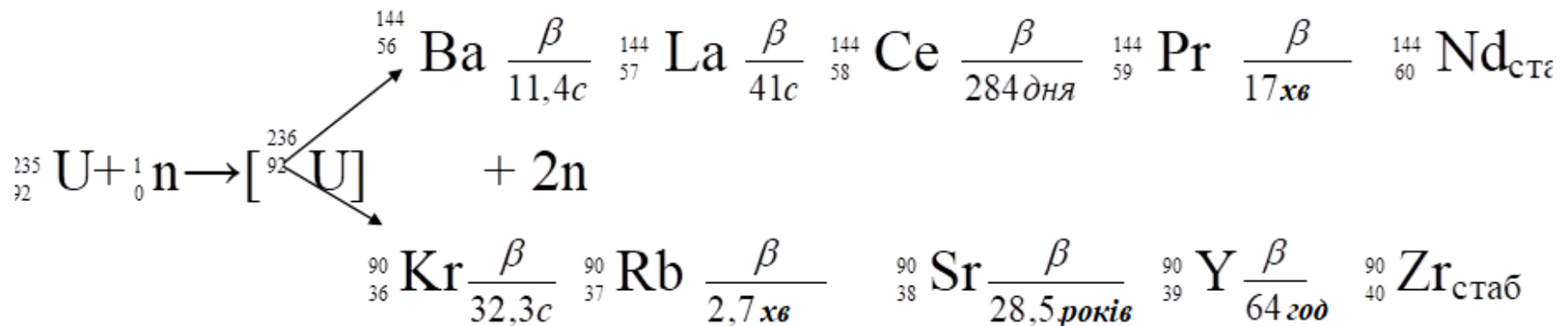
Ланцюгова ядерна реакція

Самопідтримуюча реакція поділу важких ядер, в результаті якої безперервно відтворюються нейтрони, що ділять все нові і нові ядра, називається ланцюговою ядерною реакцією.

Перший ядерний реактор побудував і першим здійснив у ньому (2 грудня 1942 р.) ланцюгову ядерну реакцію Енріко Фермі



або



**Реакції вимушеного поділу важких ядер (n, f).
Ланцюгові ядерні реакції**

Уламки поділу

Серед уламків розподілу та їх продуктів, що утворюються внаслідок численних ланцюжків розпаду, виявлено понад 250 різних ізотопів.

Періоди напіврозпаду цих радіоактивних ядер коливаються від часток секунди до мільйонів років.

Уламки поділу, всі без винятку, є β -радіоактивними.

Це впливає з того, що у важких ядрах є великий надлишок нейтронів.

Тому уламки поділу утворюють радіоактивні сімейства або ланцюжки бета-розпадних елементів.

Ланцюжок закінчується утворенням або стабільного, або довговічного ізотопу

Основні характеристики ланцюгової ядерної реакції

1. Коефіцієнт розмноження, $K = \frac{N_n}{N_p}$.

Для розвитку ланцюгової реакції необхідно щоб відношення числа нових нейтронів, отриманих при поділі в об'ємі речовини до нейтронів спочатку присутніх в цьому обсязі, було не менше одиниці.

Це відношення називається коефіцієнтом розмноження і визначає розвиток ланцюгової ядерної реакції. Якщо $K > 1$, реакція може вийти з-під контролю і може статися вибух. При $K < 1$ ланцюгова реакція зупиняється.

2. Критична маса: Мінімальна маса матеріалу, що ділиться, необхідна для здійснення ланцюгової реакції називається критичною масою.

Приблизні величини критичної маси для U-238 – 40т, для U-235 – 20кг, Pu-239 – 7кг, для Cf-249 – 3г.

3. Критичний радіус: Радіус кулі, у якому коефіцієнт розмноження нейтронів дорівнює 1, називається критичним радіусом.

Продукти ділення

У ядерному реакторі при розподілі U-235 під впливом повільних нейтронів утворюється понад 250 нуклідів 35 елементів, тобто. елементи від цинку (30Zn) до тербію (65Tb), більшість яких радіоактивна.

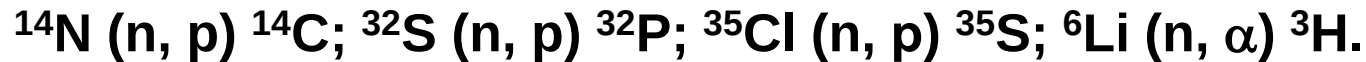
З продуктів розподілу вперше були виділені у вагових кількостях такі елементи як технецій (Tc-43) та прометій (Pm-61), які не мають довгоживучих (порівняних із віком Землі) ізотопів, тому відсутніх у природі.

При розподілі ядер утворюються у значних кількостях стабільні ізотопи таких цінних елементів як рутеній (до 38кг на 1 т продукту, що ділиться), родій (16 кг/т), паладій (7 кг/т), ксенон (13 м3/т).

Величезна кількість радіоактивних елементів утворюється внаслідок вибуху атомної бомби

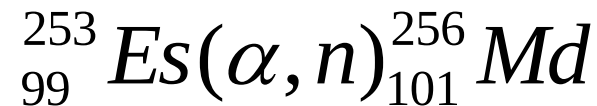
2.3. Реакції, у яких змінюється заряд ядра

У ядерному реакторі з нейтронами в кілька MeV (швидкі нейтрони) можуть проходити порогові реакції (n, p) та (n, α). Таким шляхом утворюються чотири найважливіші радіоактивні ізотопи ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S і ^3H за реакціями:



Для отримання радіонуклідів, крім ядерних реакторів використовують прискорювачі частинок та гамма-квантів – електростатичні, лінійні прискорювачі та циклотрони.

В електростатичних та лінійних прискорювачах частинки розганяються одним електричним полем, у циклотронах одночасно з електричним діє магнітне поле.



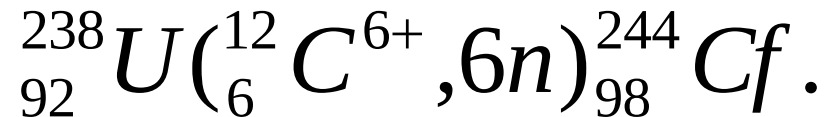
Синхрофазотрон



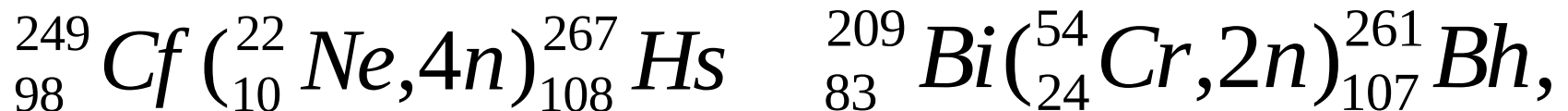
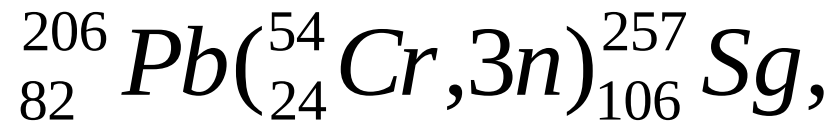
Синхрофазотрон – прискорювач заряджених частинок

Прискорення багатозарядних іонів

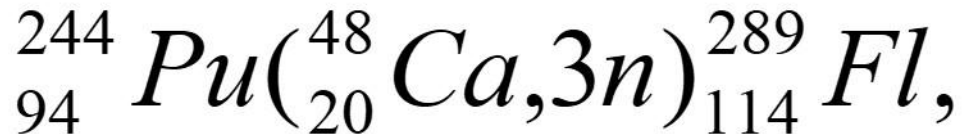
Бомбардуванням у циклотроні урану-238 іонами вуглецю був отриманий каліфорній-244:



Однак легкі снаряди іони вуглецю або кисню дозволили просунутися лише до елементів 104-105. Згодом для синтезу більш важких ядер опроміненням стабільних ізотопів свинцю та вісмуту іонами хрому були отримані ізотопи з порядковими номерами 106 та 107:



Синтез трансактиноїдів 114, 116



- Флеровій. Синтезований у 2000г, Дубна. 24 листопада 2012 р. Елемент обозначений Fl. В 2011 р. внесений таблицю Д.І. Менделєєва



- Ліверморій. У 2000 синтезовано. 1 червня 2011 року ІЮПАК офіційно визнало відкриття ліверморій та пріоритет у цьому вчених з ОІЯД та Лівермору.

Синтез 113 115, 117, 118 елементів

113 елемент – колаборація інституту РИКЕН (Японія);

115 та 117 елементи – колаборація Об'єдиненого інституту ядерних досліджень (ОІЯД, Дубна, Росія), Ліверморської національної лабораторії (LLNL, США) та Національної лабораторії Оак-Ридж в Теннессі (ORNL, США) .

118 елемент – колаборація ОІЯД (Дубна, Росія) та LLNL (США).

Синтез 115, 117 і 118 елементів здійснено в Дубні в ОІЯД на прискорювальному комплексі У-400 Лабораторії ядерних реакцій фм. Г.М.Фльорова в реакціях прискорених іонів Са-48 з актинідними мішенями (америцій-243 – 115 елемент, берклій-249 – 117 елемент, калифорній-249 – 118 елемент).

08.06.2016 г ІУРАС виніс своє вмізначення за запропонованими назвами, а саме:

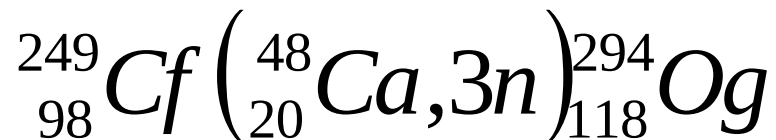
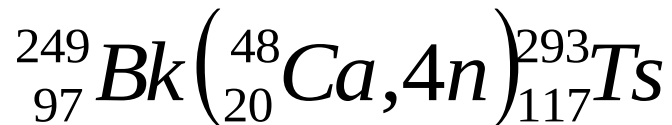
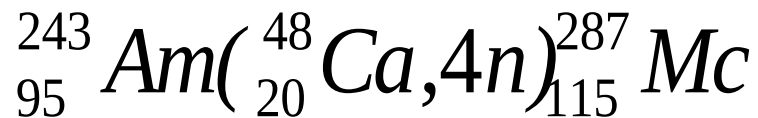
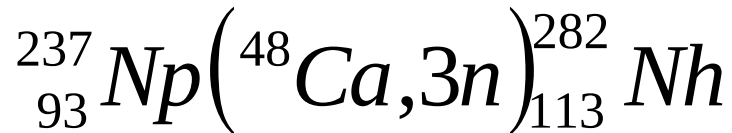
Нихоній и символ Nh для елемента 113, (2003–2004р).

Московій та символ Mc для елемента 115, (2004–2005р)

Теннессін та символ Ts для елемента 117 (2009–2010р)

Оганесон та символ Og для елемента 118. (2002–2005р.р.)

Синтез трансактиноідів 113,115, 117, 118



- колаборація інститута РИКЕН (Японія)
- Московій В 2004 і 2005 рр. в ОІЯД (сумісно з Ліверморською національною лабораторією, LLNL) 2004–2005 рр.
- ОІЯД сумісно з Національною лабораторією Оак-Рідж в Теннессі (ORNL)
- коллборація ОІЯД (Дубна, Росія) и LLNL (США, Каліфорнія).

3. Отримання радіонуклідів з продуктів розпаду урану та торію

В результаті радіоактивного розпаду, і утворюється суміш радіоактивних і нерадіоактивних елементів. У складі продуктів розпаду ізотопів знаходяться радіоактивні ізотопи елементів з порядковими номерами від 81 до 92, а в продуктах розпаду – ізотопи елементів з порядковими номерами від 81 до 90.

