

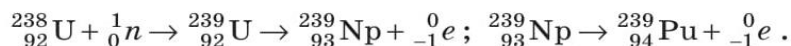
§ 42. ЛАНЦЮГОВА РЕАКЦІЯ ПОДІЛУ ЯДЕР УРАНУ. ТЕРМОЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ



Наприкінці 1938 р. було виявлено, що ядро Урану (важке ядро), поглинаючи нейтрон, «лускає» — розпадається на два осколки (на два легші ядра). У січні 1939 р. Енріко Фермі звернув увагу на те, що, за розрахунками, під час поділу ядра Урану повинні утворюватися нейтрони, які можуть знову захопитися ядрами Урану, тому можлива ланцюгова ядерна реакція. Згадаємо, як ці два відкриття привели до створення ядерного реактора.

1 Поділ важких ядер і ланцюгова ядерна реакція

Розглядаючи ядерні реакції, ви дізналися, що ядро може захоплювати нейтрон. У більшості випадків це приводить до β^- -радіоактивності: через деякий час один із нейтронів усередині ядра перетворюється на протон, електрон і нейтрино. Електрон і нейтрино вилітають із ядра, а нове ядро має порядковий номер, який на одну одиницю більший за порядковий номер первинного ядра. Саме так були отримані *трансуранові елементи*, наприклад Нептуній і Плутоній:



Захоплення нейтрона ядром Урану може привести й до іншого результату: унаслідок захвату нейтрона ядро збуджується та майже миттєво

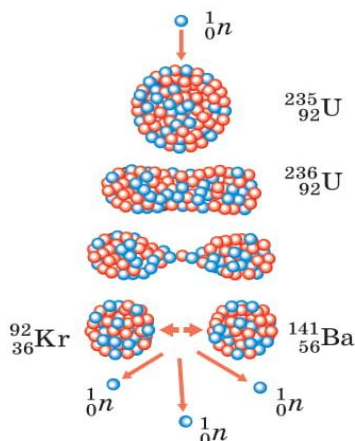


Рис. 42.1. Схема поділу ядра Урану. Поглинаючи нейтрон, ядро Урану збуджується і набуває видовженої форми; поступово розтягуючись, нове нестійке ядро розпадається на два осколки

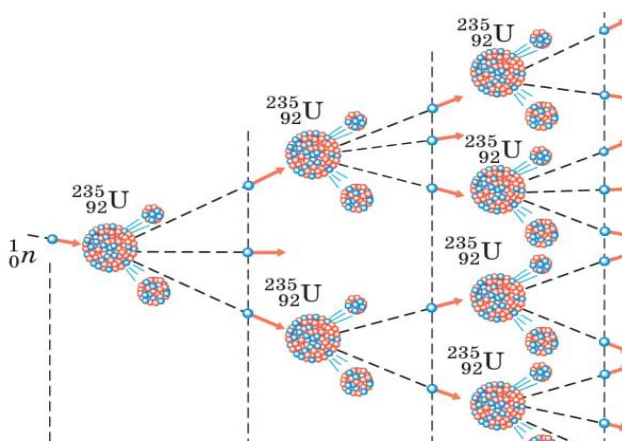


Рис. 42.2. Схематичне зображення ланцюгової ядерної реакції: під час одного акту поділу ядра Урану вивільняються 2 або 3 нейтрони, завдяки цьому і розвивається ланцюгова ядерна реакція

розпадається (розщеплюється) на два осколки (рис. 42.1). Під час розщеплення ядра Урану крім осколків поділу вивільняються нейтрони. Ці вторинні нейтрони можуть спричинити поділ інших ядер Урану, які, у свою чергу, також випустять нейтрони, що здатні викликати поділ наступних ядер, і т. д. Отже, в урановому зразку може відбуватися **ланцюгова ядерна реакція поділу**.

Якщо кількість нейтронів, що вступають у реакцію, збільшуватиметься, то кількість актів поділу зростатиме лавиноподібно (рис. 42.2) — відбудеться **ядерний вибух**. Якщо кількість ядер Урану, що вступили в реакцію, підтримувати на одному рівні, то матимемо справу з *керованою ланцюговою ядерною реакцією поділу*.

Ланцюгова ядерна реакція супроводжується виділенням величезної кількості енергії, адже утворюються ядра з більшою питомою енергією зв'язку: для ядра Урану-235 питома енергія зв'язку дорівнює приблизно 7,6 МеВ/нуклон, а для ядер осколків — елементів середньої частини Періодичної системи хімічних елементів — 8,5 МеВ/нуклон. Отже, під час поділу одного ядра Урану-235 (містить 235 нуклонів) вивільняється близько 200 МеВ енергії: $\Delta E = (8,5 - 7,6) \cdot 235 \approx 200 \text{ (МеВ)}$; $\Delta E = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$.

Якщо розпадуться всі ядра, наприклад, в одному молі Урану-235 ($6,02 \cdot 10^{23}$ ядер), то виділиться енергія $E = 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 2 \cdot 10^{13}$ (Дж). Це еквівалентно енергії, яка виділяється під час згорання 2000 т дров.

? Скільки дров треба спалити, щоб отримати енергію, яка виділяється під час повного розпаду 1 г урану ($^{235}_{92}\text{U}$)?

2 Як здійснити ланцюгову ядерну реакцію

Гіпотеза Е. Фермі щодо можливості ланцюгової ядерної реакції відразу була прийнята фізиками, хоча й суперечила фактам: ніхто не бачив цієї реакції в природному урані. Чому ж не бачили? Адже навколо нас завжди є певна кількість вільних нейтронів (1000 таких нейтронів щосекунди пролітає через тіло людини), які можуть потрапити в урановий зразок і спричинити початок ланцюгової реакції. До того ж дослідження показали, що під час поділу 100 ядер Урану вивільняється 242 нейтрони, а це означає, що урановий зразок майже миттєво повинен вибухати. Цього, однак, не відбувається.

Річ у тім, що природний уран в основному складається з двох радіонуклідів: $^{235}_{92}\text{U}$ і $^{238}_{92}\text{U}$. Уран-235 ділиться під впливом як швидких, так і повільних нейтронів (краще під впливом повільних). А от Уран-238 ділиться під впливом тільки частини швидких нейтронів (він майже не захоплює повільні нейтрони, а 80 % швидких нейтронів захоплює без ділення). У природному урані 149 ядер із 150 є ядрами Урану-238, а більшість нейтронів, вивільнених під час розпаду, є швидкими, тому, якщо вони і захоплюються ядрами Урану-238, вторинні нейтрони майже не з'являються.

Сподіваємося, ви здогадалися: щоб реакція все ж таки відбулася, слід *збагачувати природний уран ізотопом $^{235}_{92}\text{U}$ і (або) сповільнювати нейтрони*.

Однак це не все. Навіть якщо взяти чистий уран, що складається тільки з нукліда $^{235}_{92}\text{U}$, або чистий плутоній ($^{239}_{94}\text{Pu}$), ядра якого також діляться, захоплюючи нейтрон, то за невеликої маси зразка ланцюгова ядерна реакція не розвинеться, адже більшість нейтронів вилетить із зразка, так і не зіштовхнувшись з ядром. Якщо збільшувати масу зразка, то кількість нейтронів, що вступає в реакцію поділу, буде збільшуватися, а з досягненням певної критичної маси почне розвиватися ланцюгова ядерна реакція. Найменшу критичну масу має зразок, виготовлений у формі кулі (за даного об'єму площа сфери є найменшою). Наприклад, найменша критична маса для чистого урану ($^{235}_{92}\text{U}$) становить близько 50 кг (куля діаметром 17 см), а для чистого плутонію ($^{239}_{94}\text{Pu}$) — 11 кг (куля діаметром 10 см). Якщо два зразки урану ($^{235}_{92}\text{U}$), маса кожного з яких ледь менша від критичної, привести до дотику, відбудеться надпотужний ядерний вибух.

3 Як працює ядерний реактор

Ланцюгова реакція поділу, яка відбувається в урані та деяких інших речовинах, є основою для перетворення ядерної енергії на теплову й електричну. Під час ланцюгової реакції безупинно з'являються осколки поділу, які мають величезну кінетичну енергію. Якщо урановий стрижень занурити в теплоносії, то осколки віддаватимуть йому свою енергію. У результаті теплоносії нагріються. Саме так працює *ядерний реактор*, у якому ядерна енергія перетворюється на теплову (рис. 42.3).

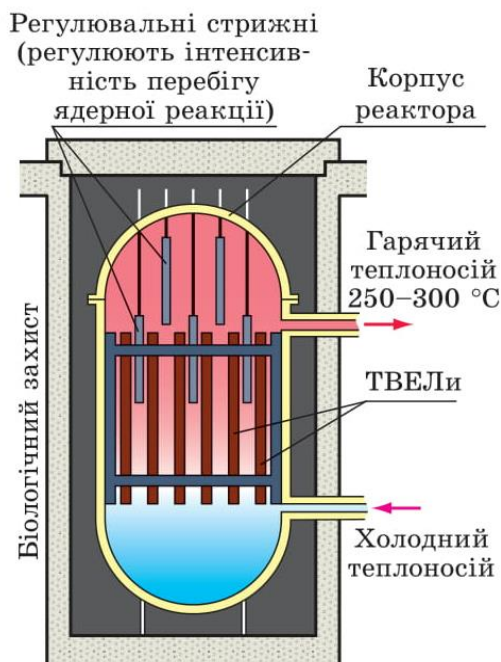


Рис. 42.3. Будова ядерного реактора

Ядерний реактор — пристрій, призначений для здійснення керованої ланцюгової реакції поділу, яка завжди супроводжується виділенням енергії.

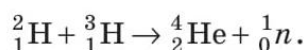
Керована ланцюгова ядерна реакція відбувається в *активній зоні* реактора. ТВЕЛи (рис. 42.4) пронизують всю активну зону реактора і занурені в *теплоносій*, який часто слугує також *сповільнювачем нейтронів*. Продукти поділу нагрівають оболонки ТВЕЛів, і ті передають енергію *теплоносію*.

Отримана енергія перетворюється далі на електричну (рис. 42.5) подібно до того, як це відбувається на звичайних теплових електростанціях.

Щоб керувати ланцюговою ядерною реакцією та унеможливити ймовірність вибуху, використовують *регульовальні стрижні*, виготовлені з матеріалу, що добре поглинає нейтрони. Так, якщо температура в реакторі збільшується, стрижні автоматично заглиблюються в проміжки між ТВЕЛами; у результаті кількість нейтронів, що вступають у реакцію, зменшується і ланцюгова реакція сповільнюється.

4 Термоядерні реакції

Вивчаючи питому енергію зв'язку, ви з'ясували, що виділення енергії може відбуватися як під час поділу важких ядер, так і під час об'єднання (синтезу) деяких легких ядер. Наприклад, якщо зблизити ядра Дейтерію ${}^2_1\text{H}$ і Тритію ${}^3_1\text{H}$, унаслідок їх об'єднання виділиться 17,6 MeV енергії (3,5 MeV на кожний нуклон), оскільки утворюється ядро Гелію ${}^4_2\text{He}$ з більшою питомою енергією зв'язку:



Реакцію злиття легких ядер у важчі ядра, яка відбувається за дуже високих температур (понад 10^7 °C) і супроводжується виділенням енергії, називають **термоядерним синтезом**.

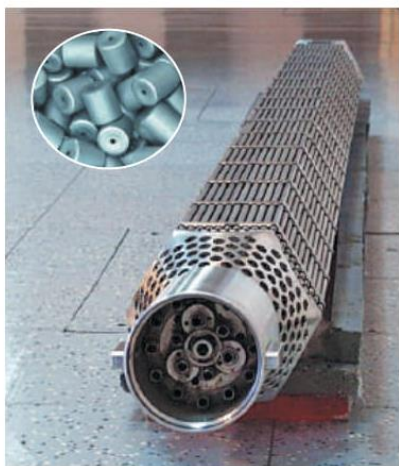


Рис. 42.4. ТВЕЛ (тепловидільний елемент) — пристрій, у якому міститься ядерне паливо (таблетки уран(IV) оксиду, збагаченого ізопом ${}^{235}_{92}\text{U}$)

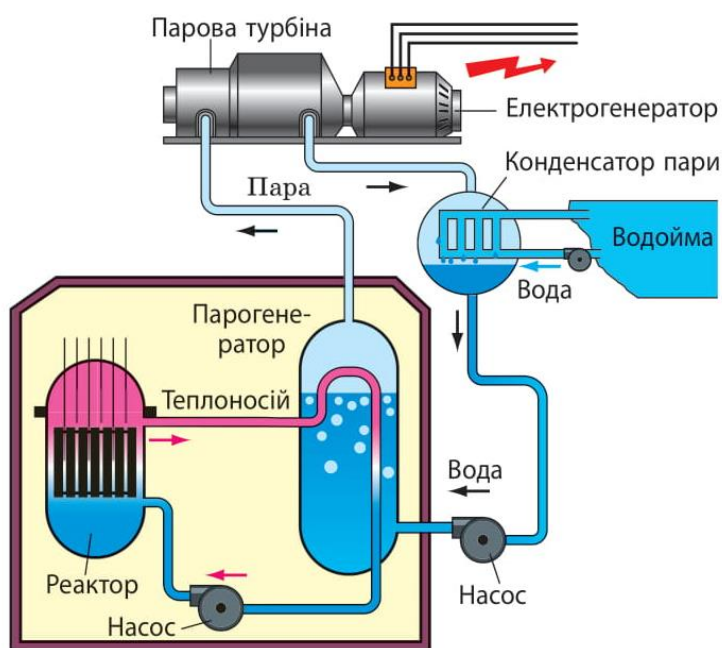


Рис. 42.5. Принцип роботи атомної електростанції

Високі температури, тобто великі кінетичні енергії ядер, потрібні для того, щоб подолати сили електричного відштовхування ядер. Без цього неможливо зблизити легкі ядра на такі відстані, на яких починають діяти ядерні сили притягання.

У природі термоядерні реакції відбуваються в надрах зір, де різні нукліди Гідрогену об'єднуються в ядра атомів Гелію. Так, за рахунок термоядерних реакцій, які відбуваються в надрах Сонця, воно щосекунди випромінює в космічний простір $3,8 \cdot 10^{26}$ Дж енергії. Це колосальна енергія — щоб стільки її отримати, потрібно спалити в тисячу разів більше вугілля, ніж усі відомі запаси на Землі.

Термоядерні реакції — це майже невичерпне джерело енергії. Фізики вже навчилися створювати умови для виникнення таких реакцій, а от їх використання в промисловому масштабі поки що залишається на рівні експериментів. Освоєння термоядерного синтезу виявилось значно складнішим, ніж здавалося на початку досліджень. Але фізики впевнені: майбутнє енергетики — за термоядерним синтезом.

5 Атомна енергетика України

Україна належить до тих країн світу, в яких завдяки наявності високих технологій, висококваліфікованих інженерів і вчених створена потужна атомна енергетика. На сьогодні в країні працюють чотири атомні електростанції: Запорізька, Рівненська, Южно-Українська, Хмельницька (рис. 42.6–42.9).

На АЕС України діють 15 атомних енергоблоків, загальна потужність яких становить 13 835 МВт, що забезпечує більш ніж половину потреб України в електроенергії. АЕС обслуговуються багатотисячними колективами висококваліфікованих фахівців. Фактично навколо кожної з українських АЕС виросло невелике місто.

Наявність в Україні джерел електроенергії, які працюють на ядерному паливі, безперечно, пом'якшує дедалі більший дефіцит «звичних» вуглеводних невідновлюваних енергоносіїв: газу, нафти, торфу, кам'яного вугілля.



Рис. 42.6. Запорізька АЕС — найбільша атомна електростанція Європи: 6 атомних енергоблоків потужністю 1000 МВт кожен



Рис. 42.7. Рівненська АЕС: 4 атомні енергоблоки загальною потужністю 2835 МВт



Рис. 42.8. Южно-Українська АЕС: 3 атомні енергоблоки потужністю 1000 МВт кожен



Рис. 42.9. Хмельницька АЕС: 2 атомні енергоблоки потужністю 1000 МВт кожен

Фізика в цифрах

Щосекунди:

- $3,8 \cdot 10^{26}$ Дж енергії випромінює Сонце в навколишній простір.
- $1,7 \cdot 10^{17}$ Дж енергії падає від Сонця на Землю.
- $0,8 \cdot 10^{17}$ Дж енергії досягає поверхні Землі.
- ✓ 10^{14} Дж енергії накопичується рослинами в ході фотосинтезу.
- ✓ 10^{13} Дж енергії (10 % енергії фотосинтезу) припадає на ріллю, луки, пасовища.
- ✓ $0,5 \cdot 10^{13}$ Дж енергії споживає людина (тобто вона споживає половину енергії, накопиченої ріллею, луками, пасовищами).



Підбиваємо підсумки

- Поглинення нейтрона ядром Урану може спричинити розпад ядра. Ця реакція супроводжується звільненням нейтронів, які містяться в ядрі, а ті, у свою чергу, можуть спричинити поділ інших ядер Урану — відбуватиметься ланцюгова ядерна реакція, яка супроводжується виділенням енергії.
- Процес перетворення ядерної енергії на теплову здійснюється в ядерних реакторах — пристроях, призначених для здійснення керованої ланцюгової реакції поділу. Основні складові ядерного реактора: сповільнювач нейтронів; теплоносій; система керування ланцюговою ядерною реакцією; система захисту.
- Виділенням енергії супроводжується і процес синтезу деяких легких ядер. Така реакція отримала назву термоядерної, оскільки для її початку необхідна дуже висока температура.
- Зараз в Україні працюють чотири атомні електростанції загальною потужністю 13 835 МВт, що забезпечує понад половину потреб України в електроенергії.



Контрольні запитання

1. Які процеси відбуваються внаслідок поглинення нейтрона ядром Урану?
2. Опишіть механізм ланцюгової ядерної реакції.
3. Чи може ланцюгова ядерна реакція відбуватися в природному урані? Відповідь обґрунтуйте.
4. Як побудований ядерний реактор? Для чого призначені його основні елементи?
5. Як працює атомна електростанція?
6. Звідки «беруть» енергію зорі?



Вправа № 42

1. Яка відповідь є правильною? Найбільша частка енергії, що вивільняється під час поділу ядра Урану, припадає: а) на кінетичну енергію вивільнених нейтронів; б) енергію γ -випромінювання; в) кінетичну енергію осколків поділу; г) енергію нейтрино, які випромінюються продуктами поділу.
2. На скільки щосекунди змінюється маса Сонця, якщо потужність його випромінювання становить $3,8 \cdot 10^{26}$ Вт?
3. Якій енергії відповідає спалення в ядерному реакторі 15 г урану ($^{235}_{92}\text{U}$), якщо в результаті поділу одного його ядра виділяється 200 МеВ енергії?
4. Потужність реактора атомного криголама — 80 000 кВт. За добу реактор споживає 500 г урану ($^{235}_{92}\text{U}$). Визначте ККД реактора.
5. Із дейтерію і тритію в результаті термоядерної реакції синтезу утворилося 2 г гелію. Яка енергія при цьому виділилася?
6. Дізнайтесь, які експерименти провели науковці, які пристрої побудували, які способи утримання плазми винайшли, намагаючись створити термоядерний реактор.