

# Ядерна фізика

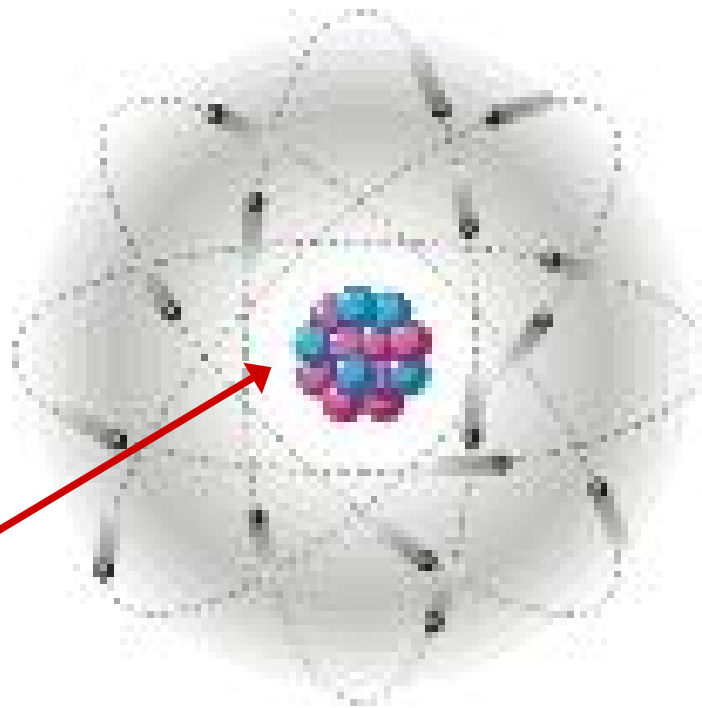
## *Зміст лекції:*

- **Вступ**
- **Протонно-нейтронна будова ядра**
- **Позначення і заряд ядра**
- **Ядерні сили**
- **Енергія зв'язку ядра**
- **Радіоактивність. Питома радіоактивність**
- **Закон радіоактивного розпаду**
- **Структура радіоактивного випромінювання**
- **Ядерні реакції**
- **Ядерний синтез**
- **Ядерний поділ. Ланцюгова ядерна реакція**

# ФІЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

Резерфорд,  
1911 р.

Бор,  
1913 р.



**Ядро** – це центральна частина атома, в якій зосереджена практично вся маса атома і його позитивний заряд

- Розрізняють **стабільні** і **нестабільні** атомні ядра.
- **Основними характеристиками стабільного атомного ядра** є кількість нуклонів у ядрі, електричний заряд ядра, маса ядра, енергія зв'язку ядра, розмір ядра, спин ядра, магнітний і електричний моменти ядра, парність хвильової функції, ізотопічний спин, статистика і т.ін.
- **Нестабільні ядра** мають низку додаткових характеристик, таких як тип радіоактивного перетворення, середній час життя, енергія, яка випромінюється при розпаді.
- **Ядра** можуть перебувати в **різних енергетичних станах** і як будь-яка квантова система мають свою, властиву тільки ядру даного нукліда, систему енергетичних рівнів. Існує **основний та збуджені** стани ядра.

# Протонно-нейтронна будова ядра

*Гейзенберг і Іваненко*

Ядро атома складається з **нуклонів**: протонів і нейтронів.

**Зарядове число - кількість протонів ( $Z$ )** у ядрі визначає заряд ядра, кількість електронів в атомі та порядковий номер хімічного елемента в таблиці Менделєєва.



**- протон**

$$q_p = +|e| = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл,}$$

$$m_p = 1.673 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1836 m_e$$



**- нейтрон**

$$q_n = 0,$$

$$m_n = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1838.5 \cdot m_e$$



**- ядро**

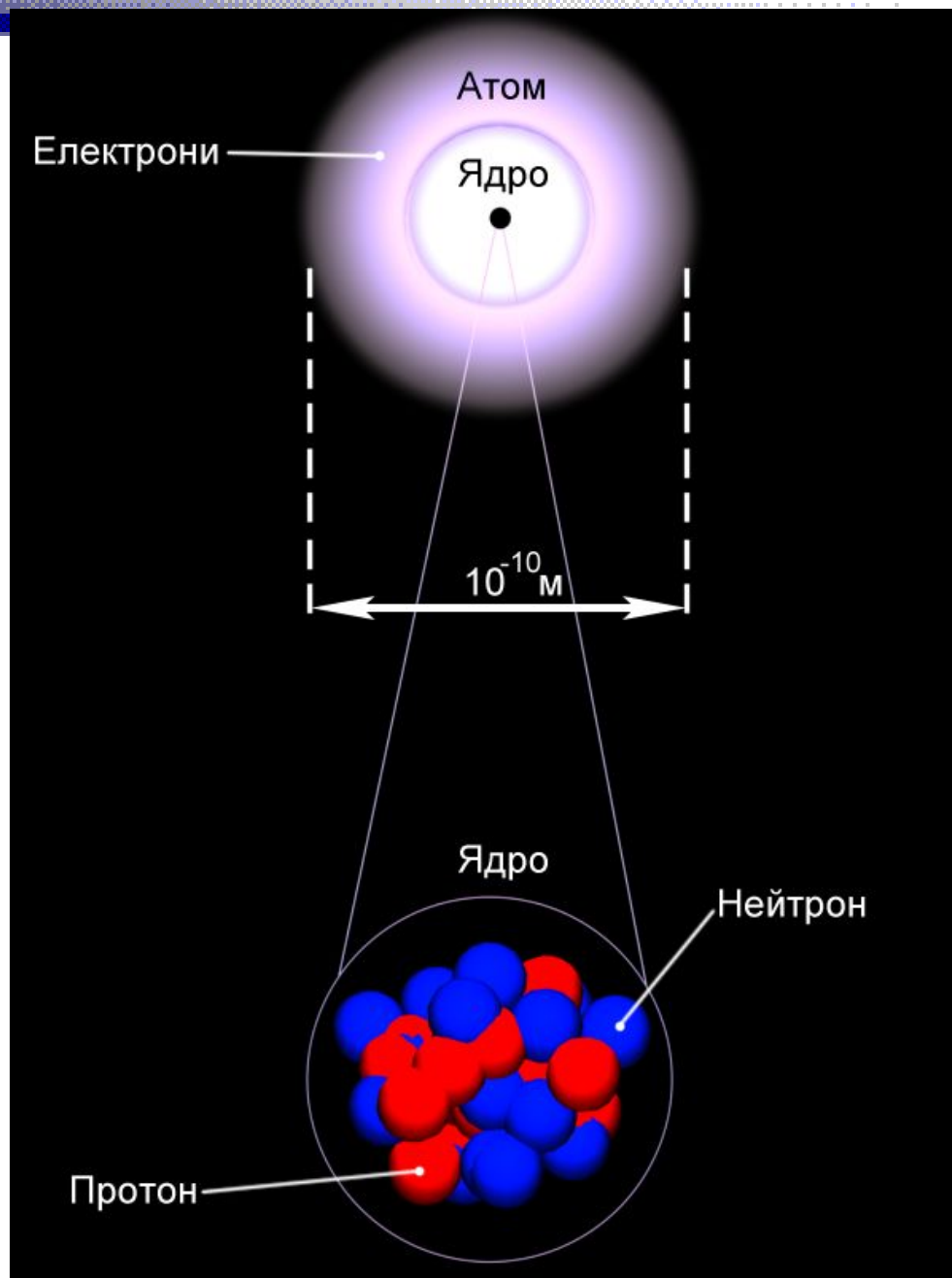
$$m_p \approx m_n \approx 1 \text{ а.о.м.}$$

Радіус ядра

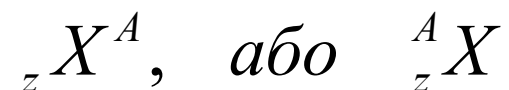
$$R = 1,3 \cdot 10^{-15} \sqrt[3]{A} \text{ м}$$

Число нейтронів ( $N$ ) і протонів ( $Z$ ) у ядрі дорівнюють **масовому числу ( $A$ )** – числу нуклонів :

$$A = Z + N$$



Атоми, ядра яких мають конкретні значення  $A$  і  $Z$ , називаються **нуклідами**. Для позначення ядер застосовується такий запис :



**Наприклад**  ${}_{92}^{238}U$  або  ${}^{238}U$ ,  ${}_6^{12}C$  або  ${}^{12}C$

**Ізотопи** – ядра з однаковим числом протонів, але різним – нейтронів.

**Ізотопи водню:**  ${}^1H$  - водень,  ${}^2H$  - дейтерій,  ${}^3H$  - тритій.

**Ізотопи урану:**  ${}^{233}U$ ,  ${}^{235}U$ ,  ${}^{238}U$

**Ізобари** – це нукліди з однаковим масовим числом, але різним числом протонів. Наприклад,  ${}^3H$ ,  ${}^3He$  - ізобари тритію і гелію

${}^{10}Be$ ,  ${}^{10}B$ ,  ${}^{10}C$  - ізобари берилію, бору та вуглецю.

**Ізотони** - це нукліди з однаковим числом нейтронів у складі ядра.

Наприклад, ізотони водню і гелію:  ${}^2H$ ,  ${}^3He$

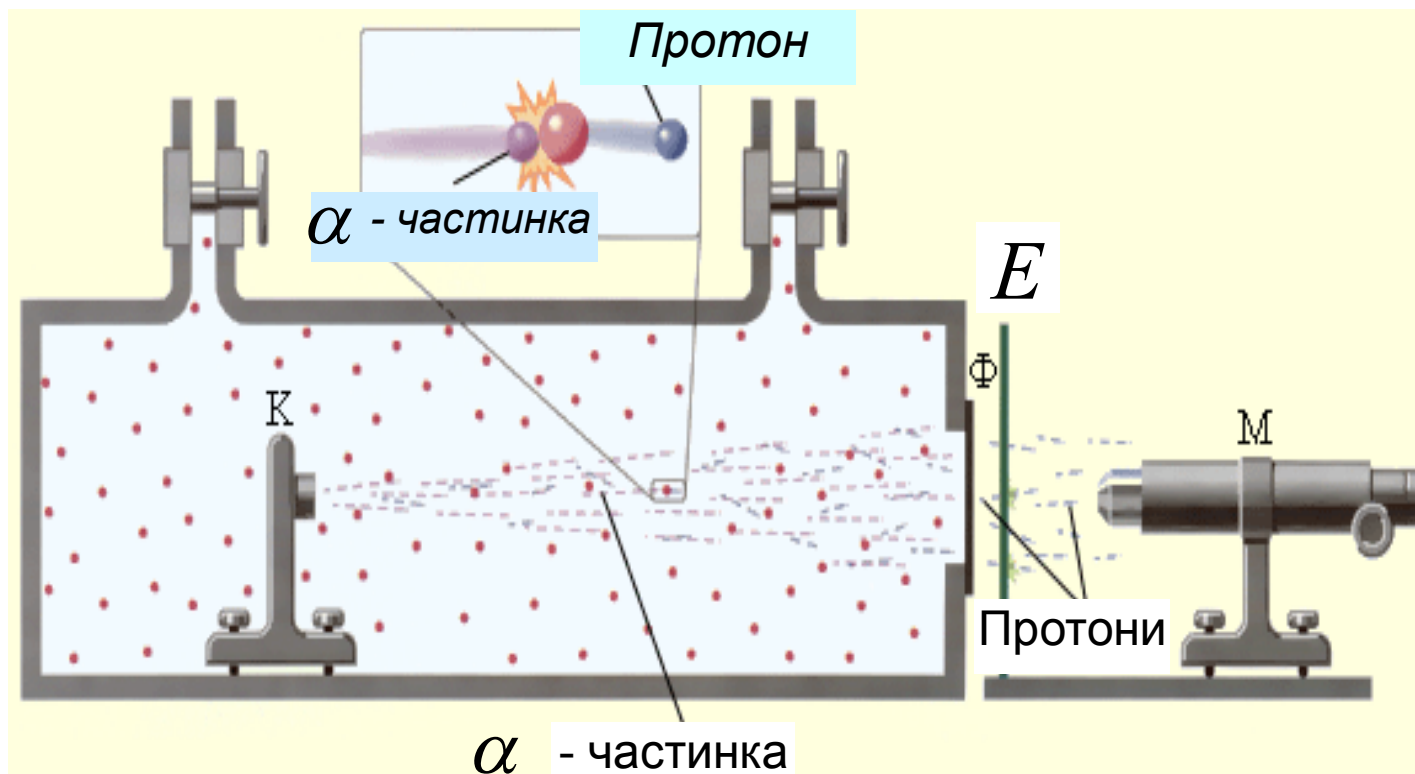
# ЗАРЯД ЯДРА

$$q_{\text{я}} = Z \cdot |e|$$

$|e| = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  - абсолютна величина  
елементарного електричного заряду

Прямі дослід з вимірювання заряду ядер були виконані Резерфордом і Чедвіком (1919 р.) та (1932 р.) з використанням закону Кулона.

# Схема дослідів Резерфорда і Чедвіка з виявлення протонів





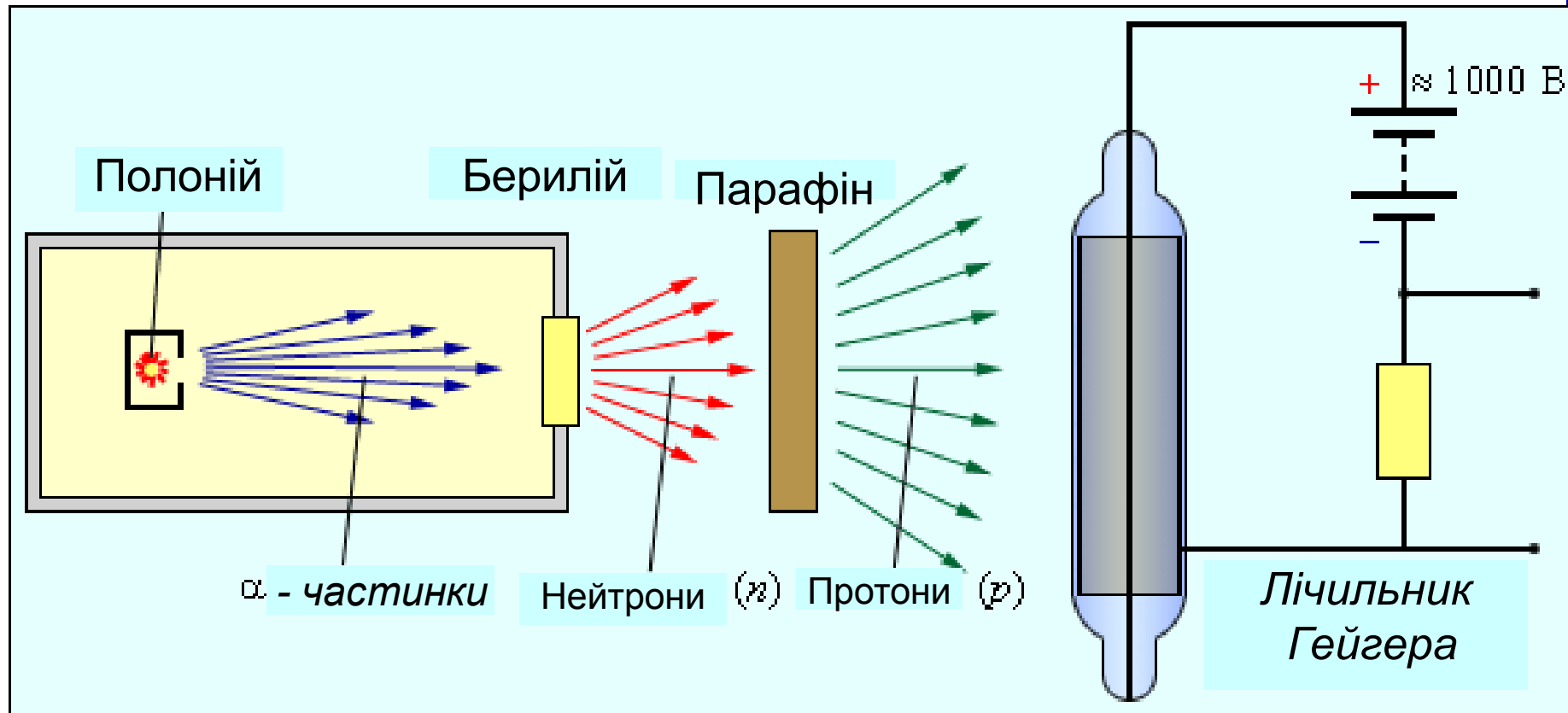
У 1920 р. Резерфорд гіпотеза про існування в складі ядер жорстко зв'язаної компактної протон - електронної пари, що являє собою електрично нейтральне утворення – частинку з масою, яка приблизно дорівнює масі протона. Він навіть придумав назву цій гіпотетичній частинці – **нейтрон**.

Електрон не може входити до складу ядра. Квантово-механічний розрахунок на підставі співвідношення невизначеностей показує, що електрон, локалізований у ядрі, тобто області розміром  $R \approx 10^{-15}$  м, повинен мати колосальну кінетичну енергію, набагато більшу за енергію зв'язку ядер, розраховану на одну частинку.

Резерфорд негайно запропонував групі своїх учнів на чолі із Дж. Чедвіком почати пошуки такої частинки.

**Для самостійного вивчення**

# Схема установки для виявлення нейтронів (дослід Чедвіка)



Для самостійного вивчення

При бомбардуванні берилію  $\alpha$ -частинками, які випромінюються радіоактивним полонієм, виникає сильне проникаюче випромінювання, здатне пройти скрізь таку перешкоду, як шар свинцю товщиною в 10–20 см. Це випромінювання майже одночасно із Чедвіком спостерігало подружжя Жоліо-Кюрі Ірен і Фредерік (Ірен – дочка Марії та П'єра Кюрі), але вони припустили, що це  $\gamma$ -промені з великою енергією. Вони виявили, що якщо на шляху випромінювання берилію поставити парафінову пластину, то іонізуюча здатність цього випромінювання різко збільшується. Вони довели, що випромінювання берилію вибиває з парафіну протони, які у великій кількості є цій речовині. За довжиною вільного пробігу протонів у повітрі вони оцінили енергію  $\gamma$ -квантів, здатних при зіткненні надати протонам необхідну швидкість. Вона виявилася величезною – порядку 50 MeV.

***Для самостійного вивчення***

# ДЖЕЙМС ЧЕДВІК



1891 -1974

Лауреат Нобелівської премії за 1935 р. за відкриття нейтрона

*Англійський фізик, член Лондонського королівського товариства (1927 р.).*

*Учень Резерфорда.*

Народився в Манчестері, закінчив Манчестерський і Кембриджський університети, стажувався у Вищій технічній школі у Г. Гейгера. Працював у Кембриджському університеті. У 1943-1945 рр. Чедвік очолював групу англійських вчених, які працювали в Лос-Аламоській лабораторії над створенням атомної бомби.

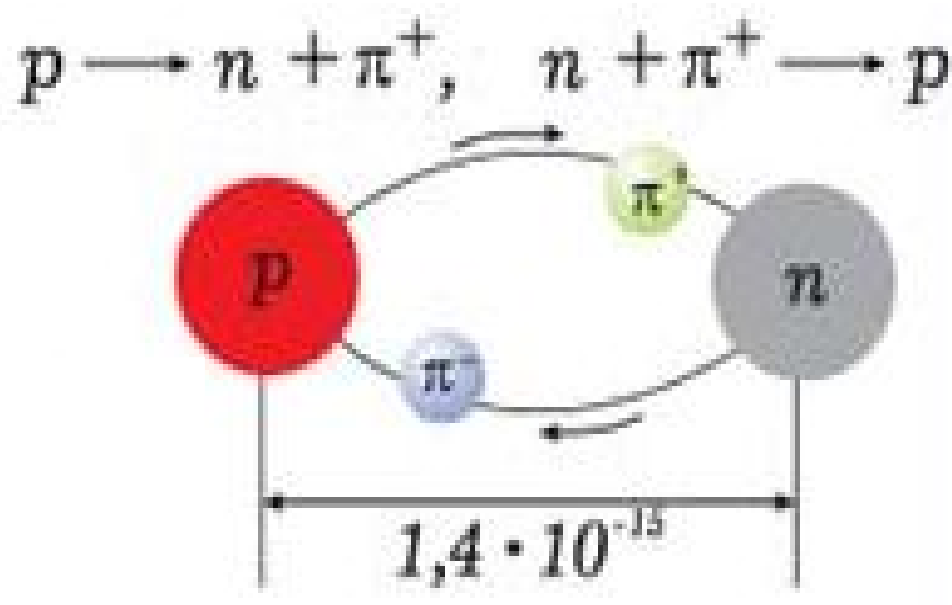
Роботи Чедвіка були присвячені проблемам ядерної фізики. В 1914 р. в одній з ранніх робіт він показав безперервність спектра **бета-випромінювання**. В 1920 р., досліджуючи розсіювання **альфа-частинок** на ядрах платини, срібла й міді, виміряв заряди цих ядер. В 1932 р. відкрив нейтрон. Займався дослідженням ланцюгової ядерної реакції; одним з перших розрахував критичну масу для урану-235.

# ЯДЕРНІ СИЛИ

## Нуклони – ядерні сили – сильна взаємодія Властивості ядерних сил

1. Ядерні сили – **близькодiючі**. На відстанях порядку  $10^{-15}$  м - це сили притягання, при значному зменшенні відстані між нуклонами - сили відштовхування.
2. Ядерні сили мають властивість **зарядової незалежності**.
3. Ядерні сили мають властивість **насичення**, тобто кожен нуклон у ядрі взаємодіє лише з обмеженою кількістю найближчих до нього нуклонів.
4. Ядерні сили **не є центральними** і залежать від орієнтації спінів нуклонів.

5. Ядерні сили мають **обмінний характер**, тобто обумовлені обміном віртуальними частинками.



# ЕНЕРГІЯ ЗВ'ЯЗКУ ЯДРА

- **Енергія зв'язку ядра** дорівнює мінімальній енергії, яку необхідно витратити для повного розщеплення ядра на окремі нуклони.
- Маса будь-якого ядра завжди менша за суму мас протонів і нейтронів, які входять до його складу

■ Дефект маси

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_J$$

■ Енергія зв'язку ядра

$$E_{зв} = \Delta m c^2$$

**Питома енергія зв'язку** - це енергія зв'язку, яка припадає на один нуклон

$$f = \frac{E_{зв}}{A}$$

**Енергетичні еквіваленти**

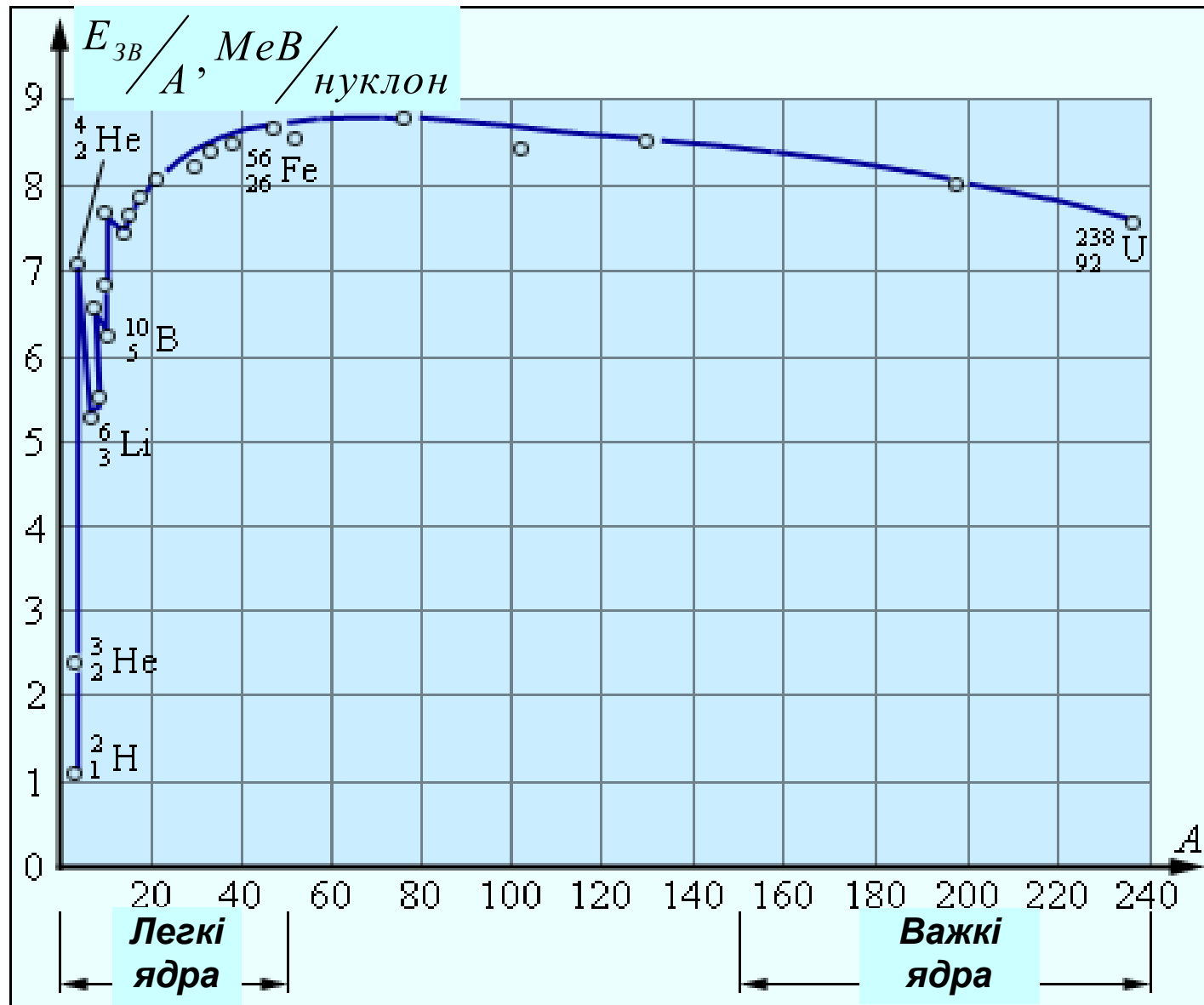
$$1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

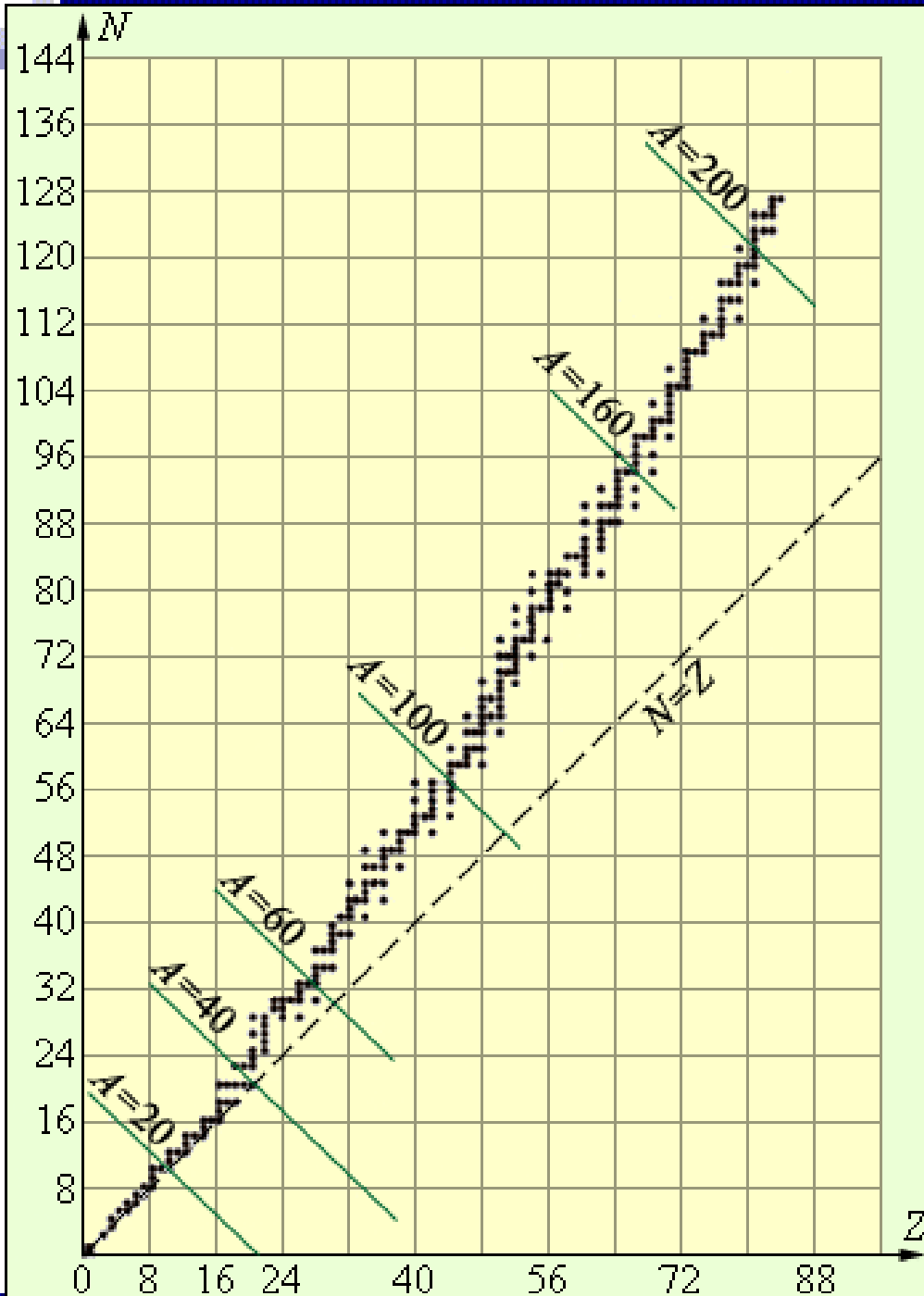
$$1 \text{ а.о.м.} \cdot c^2 = 931,4 \text{ MeV}$$

Енергія зв'язку на один нуклон визначає в кінцевому підсумку енергію будь-якої ядерної реакції.



# ЗАЛЕЖНІСТЬ ПИТОМОЇ ЕНЕРГІЇ ЗВ'ЯЗКУ ЯДЕР ВІД МАСОВОГО ЧИСЛА





## Кількість протонів і нейтронів в стабільних ядрах




**Стабільні легкі** ядра  $Z = N$ .

**Важкі ядра** через зростання енергії кулонівського відштовхування протонів для забезпечення стабільності потрібні додаткові нейтрони.

Є дві можливості одержання **позитивного енергетичного виходу**:

- 1) поділ важких ядер на більш легкі;
- 2) злиття легких ядер у більш важкі.

# Контроль

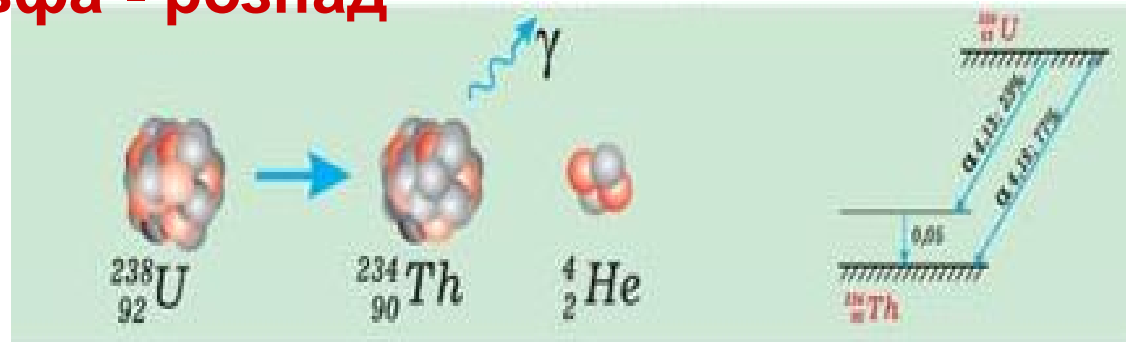
-  **6** Сили взаємодії між нуклонами є
- 1) Тільки притяганням; 2) притяганням та відштовхуванням; 3) Тільки відштовхуванням; 4) дорівнюють нулю
-  **7** Скільки протонів і скільки нейтронів містить ядро урану 237?
- 1) 0 і 237; 2) 237 та 237; 3) 92 та 145; 4) 145 та 92
-  **8** Чому дорівнює заряд ядра урану?
- 1)  $237 | e |$ ; 2)  $145 | e |$ ; 3) 0; 4)  $92 | e |$

# РАДІОАКТИВНІСТЬ

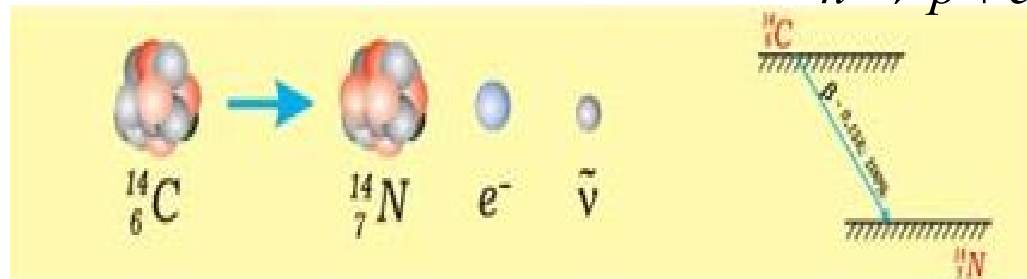
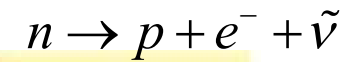
- **Радіоактивність** – це явище самочинного перетворення нестабільних ядер в інші ядра з випромінюванням частинок. Не існує стабільних ядер із зарядовим числом  $Z > 83$  і масовим числом  $A > 209$ .
- Розрізняють природну і штучну радіоактивність.
- **Явище радіоактивності** відкрито в 1896 р. **Бекерелем**, який виявив, що солі урану випускають невідоме випромінювання, здатне проникати через непрозорі для світла перешкоди й викликати почорніння фотоемульсії.
- **Штучна радіоактивність** була відкрита Ф. та І. Жоліо - Кюрі в 1934 р.

# ВИДИ РАДІОАКТИВНОСТІ

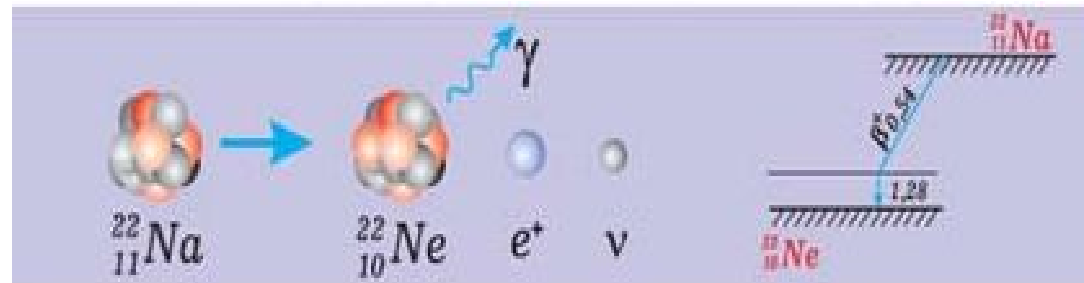
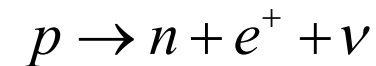
## 1 Альфа - розпад



## 2 Електронний бета – розпад



## 3 Позитронний бета - розпад



Для самостійного вивчення

# ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ

- За однакові проміжки часу розпадається однакова частина радіоактивних ядер.
- Кількість радіоактивних ядер зменшується за експонентою

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

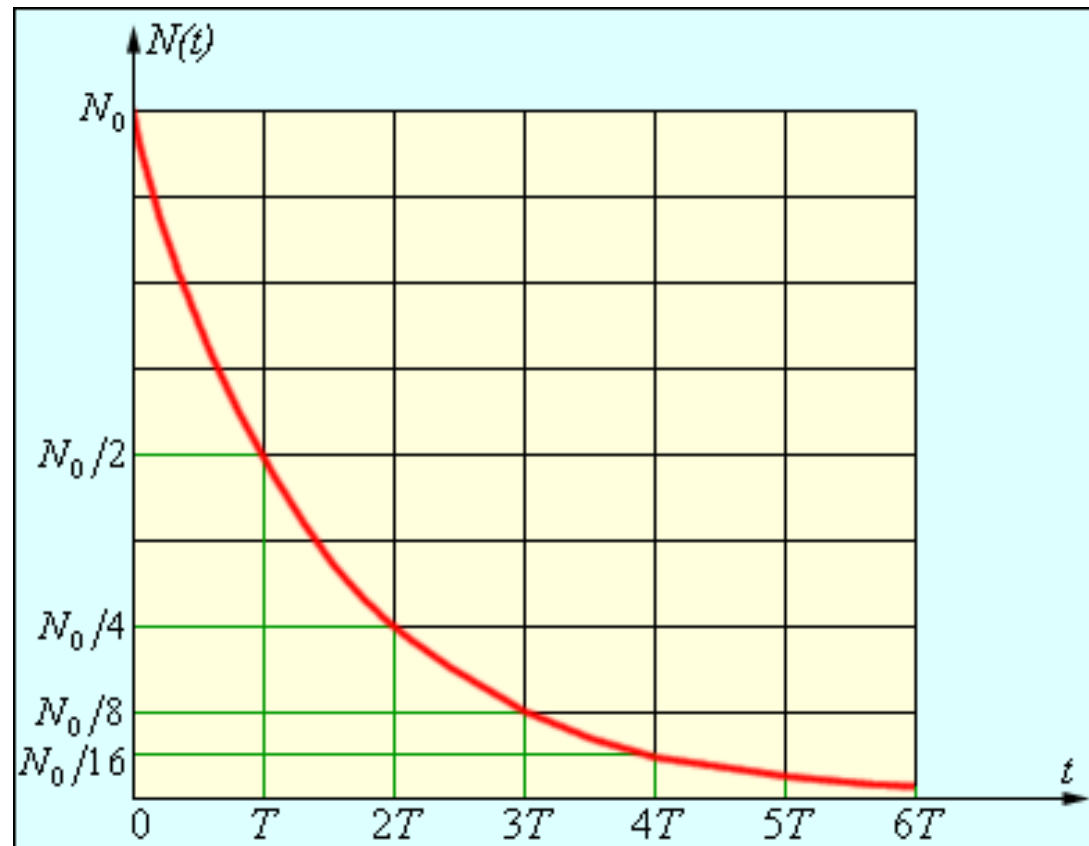
$N$  – кількість ядер, що не розпалися у момент часу  $t$

$N_0$  - кількість ядер, що не розпалися у момент часу  $t = 0$

$\lambda$  - стала розпаду

$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$  - **період піврозпаду** – час, за який розпадається половина радіоактивних ядер

# ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ



$$A = -\frac{dN}{dt} \text{ - активність}$$

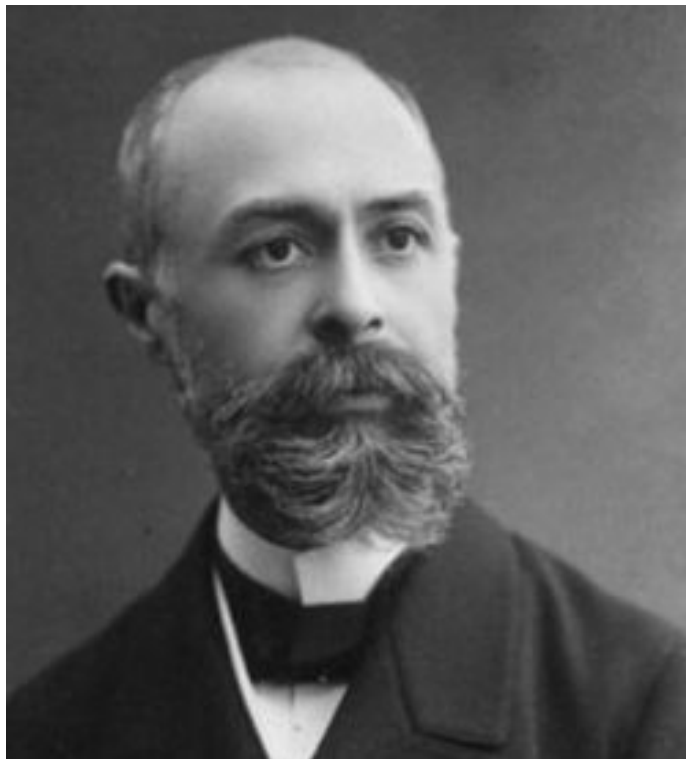
$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

$$A_0 = \lambda N_0$$

$$[A] = \frac{1 \text{ розпад}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ Бк}$$

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

# Антуан Анрі Бекерель



**1852 – 1908**

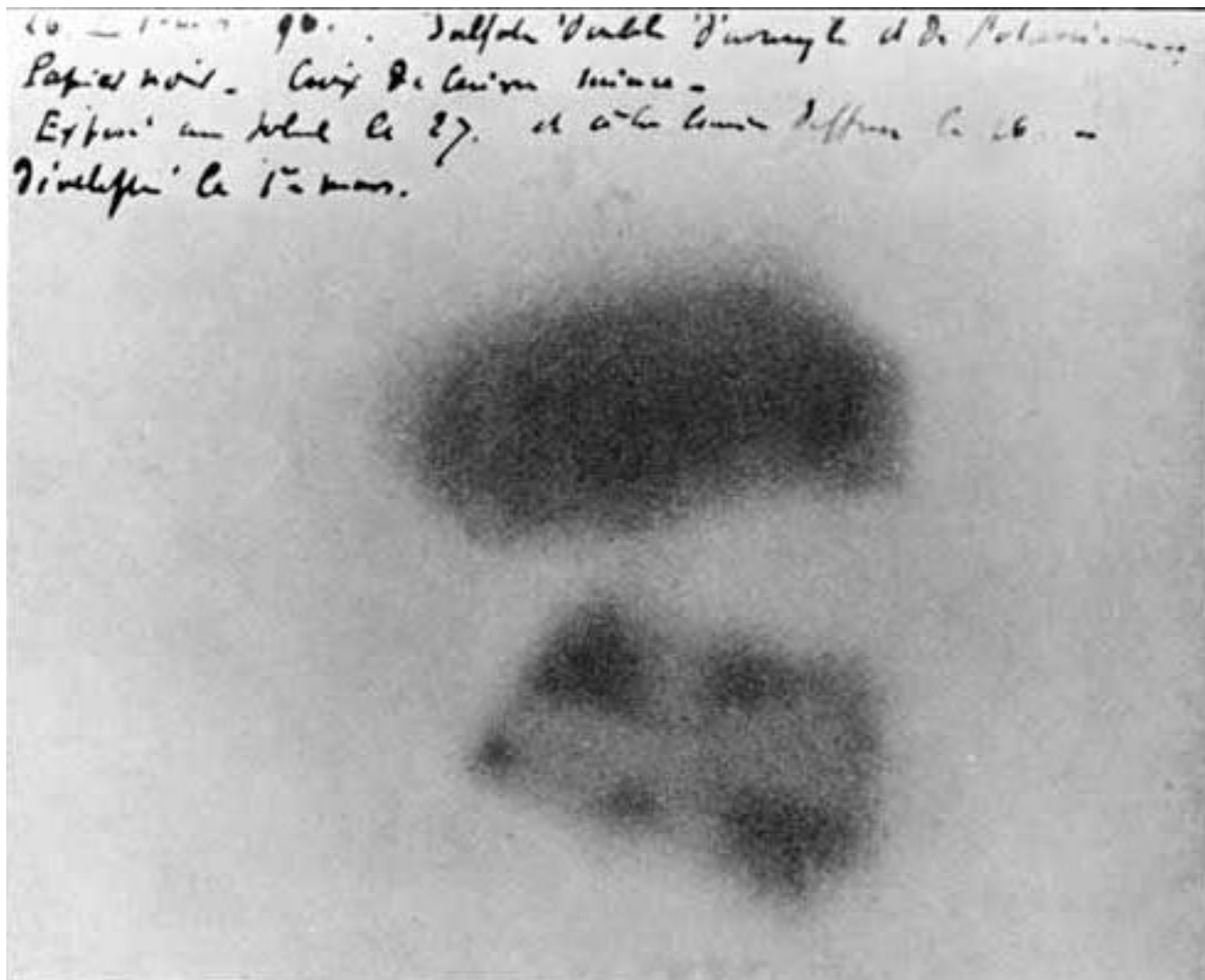
***Лауреат Нобелівської премії (1903 р.) (разом з П. і М. Кюрі ) за відкриття природної радіоактивності***

Французький вчений , народився в Парижі. Його батько і дід були відомими вченими, професорами фізики і членами Французької академії наук.

Досліджував лінійно-поляризоване світло, розробив новий метод аналізу спектрів. Після відкриття рентгенівських променів, досліджував солі урану на предмет виявлення таких променів. Він виявив, що тільки уран та його сполуки викликають потемніння фотопластинки, загорнутої в темний папір. Досліджуючи промені Бекереля довів, що до їх складу входять електрони. Учениця Бекереля Марія Кюрі відкрила, що торій також випромінює промені Бекереля. Разом з чоловіком П'єром відкрила два нових радіоактивних елемента – полоній та радій.



Зображення фотопластинки Бекереля. Видно тінь металевого мальтійського хреста, який перебував між пластинкою і сіллю урану



## **П'ЕР КЮРІ І МАРІЯ СКЛОДОВСЬКА-КЮРІ**



**П'єр Кюрі ( 1859-1906) і**

**Марія Склодовська -  
Кюрі (1867-1934)**

В 35 – ти річному віці французький фізик П'єр **Кюрі** був відомим вченим в області кристалографії та магнетизму. Однак на рубежі XIX і XX вв. сфера його наукових інтересів змінилася: разом зі своєю дружиною - випускницею Паризького університету **Марією Склодовською - Кюрі** він зайнявся з'ясуванням природи уранового випромінювання і вивченням радіоактивності. Після загибелі свого чоловіка Марія продовжила наукові дослідження в області радіоактивності, очолила в Паризькому університеті кафедру, якою керував раніше П'єр. Марія Склодовська-Кюрі померла в 1934 р. від променевої хвороби. Її лабораторні зошити дотепер зберігають високий рівень радіоактивності.

# **Фредерік (1900-1958) і Ірен Жоліо Кюрі (1897-1956), Нобелівська премія з хімії 1935р**

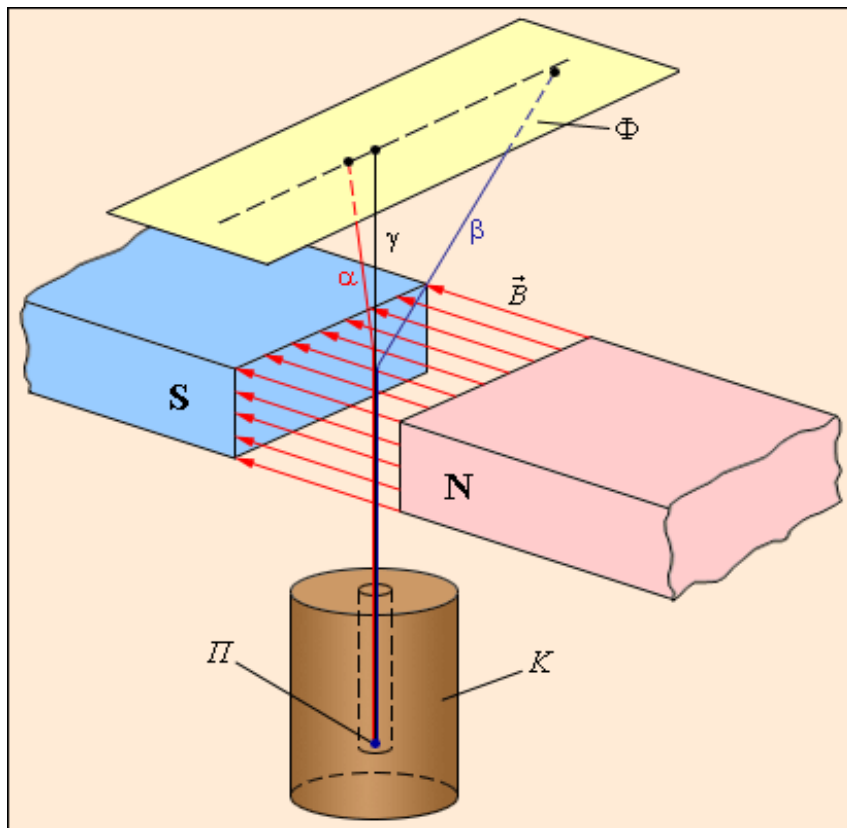


Ф. Жоліо познайомився із І. Кюрі в Інституті радію, де він працював препаратором у М. Кюрі. Ірен у 1925р. захистила докторську дисертацію. Фредерік - через п'ять років. З 1937 року він працював у Коледж де Франс. Ірен - на кафедрі фізики в університеті Парижу. Під час війни Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі брали участь в русі опору, а після неї

були активними борцями за мир. Під керівництвом Фредеріка Ж.-К. у 1948 році був пущений перший французький ядерний реактор.

# СХЕМА ЕКСПЕРИМЕНТУ РЕЗЕРФОРДА

**з виявлення складної структури  
радіоактивного випромінювання**



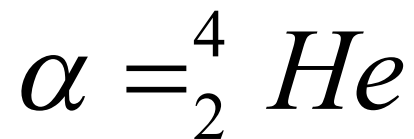
К – свинцевий  
контейнер,

П – радіоактивний  
препарат,

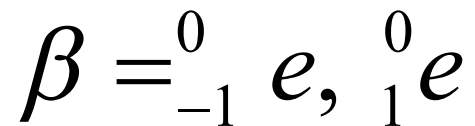
Ф – фотопластинка,

В – магнітне поле.

# СТРУКТУРА РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ



- альфа - частинка



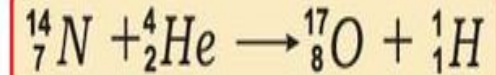
- бета - частинка

$\gamma$

- жорстке електромагнітне  
випромінювання

# ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ

Перша, здійснена людиною ядерна реакція



**Ядерні реакції** - це реакції перетворення ядер одних хімічних елементів на ядра інших елементів. Ядерні реакції супроводжуються виділенням чи поглинанням енергії.

Типи ядерних реакцій: **реакції синтезу і реакції поділу.**

**Ядерним синтезом** називається процес злиття ядер легких елементів з утворенням більш важких ядер. Це **термоядерні реакції** (10-100 млн. К ).

**Ядерним поділом** називається процес розщеплення ядра важкого елемента на осколки.

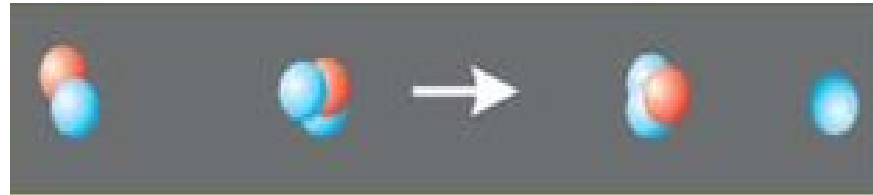
**Енергетичний вихід ядерної реакції** визначається формулою

$$Q = \Delta mc^2$$

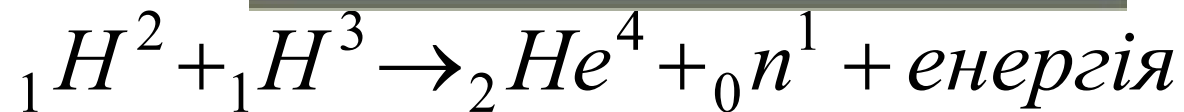
де *дефект маси* визначається різницею маси ізотопу до розпаду і продуктів розпаду.

# ЯДЕРНИЙ СИНТЕЗ

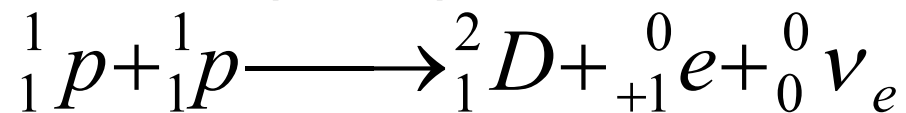
Воднева бомба



$Q=17,6\text{MeV}$



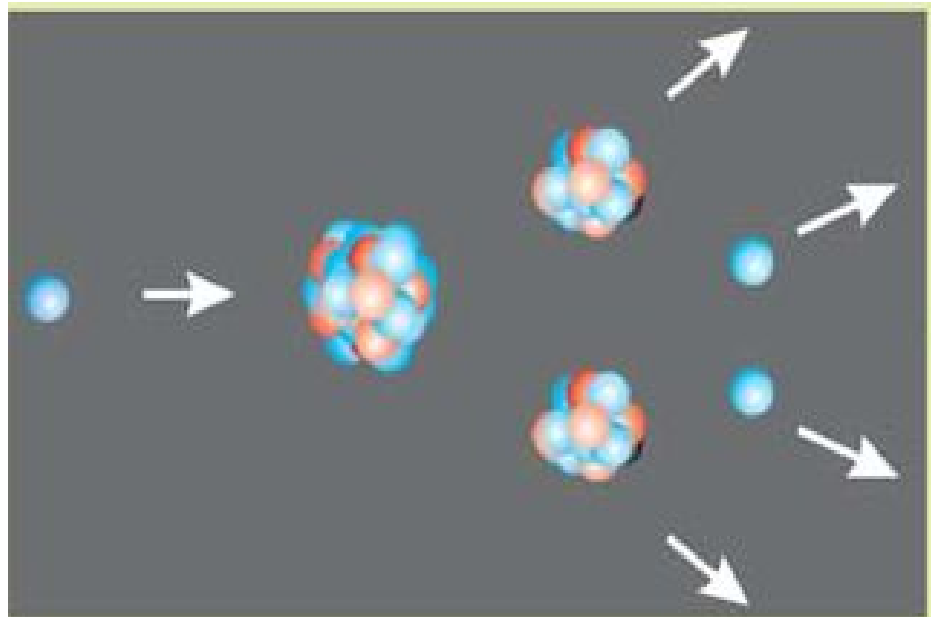
Термоядерний протон – протонний цикл, який відбувається в надрах зірок



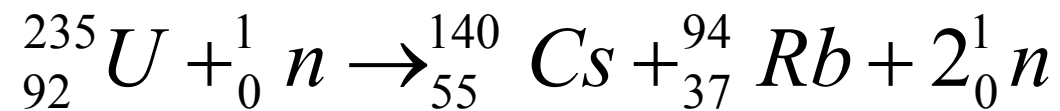
[Анімація](#)

# ЯДЕРНИЙ ПОДІЛ

В 1938 р. Ган і Штрассман виявили, що при опроміненні урану нейтронами утворюються елементи з середини періодичної системи



$$Q = 17,6 \text{ MeV}$$



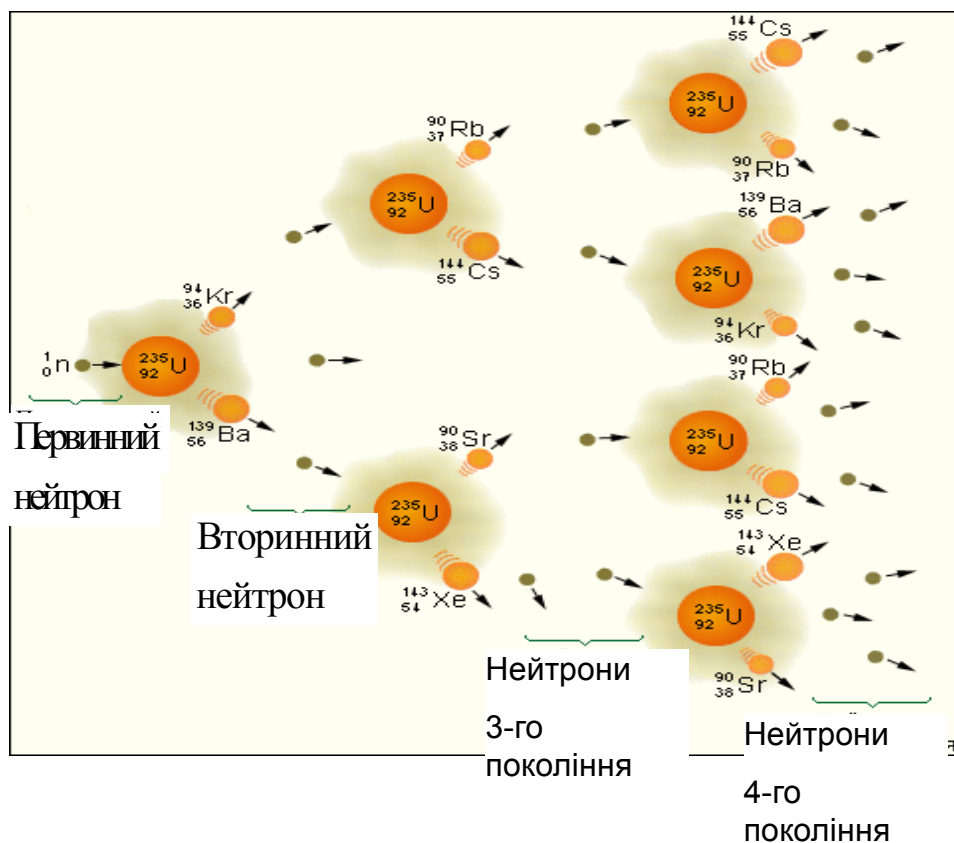


# ЯДЕРНИЙ ПОДІЛ

Перший уран – графітовий реактор – 1942  
р. Чікагський університет, Фермі

Радянський Союз – 1946 р., Курчатова

# ЛАНЦЮГОВА ЯДЕРНА РЕАКЦІЯ

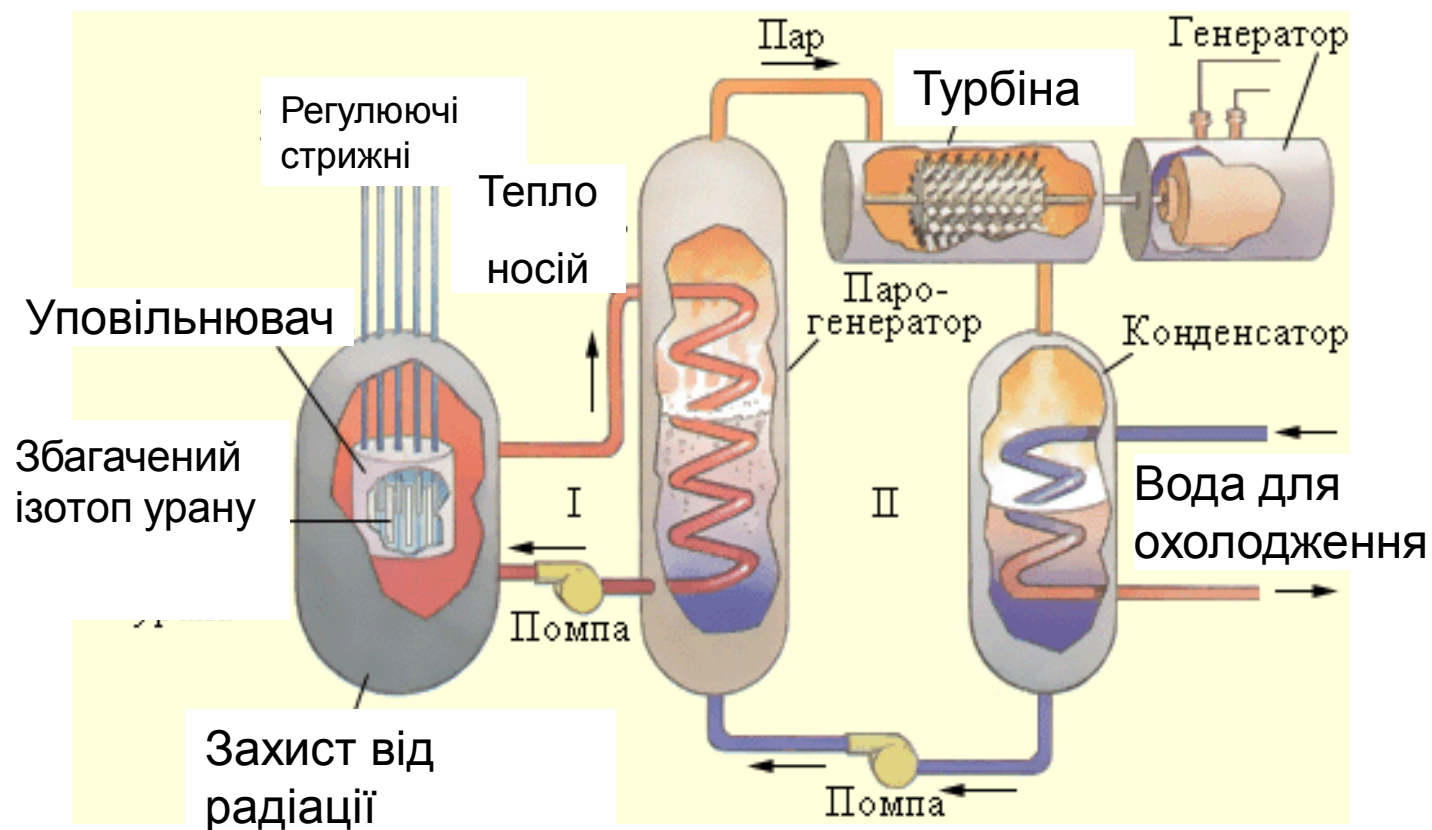


**Критична маса** – це маса урану, при якій починається ланцюгова ядерна реакція (50 кг для урану - 235).

Уповільнювач нейтронів – важка вода

Анімація

# СХЕМА БУДОВИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА



# Завдання для самостійного вивчення

- Типи радіоактивного розпаду: альфа-розпад, бета – розпад, гамма – активність ядер
- Властивості випромінювання та реєстрації радіоактивного та методи його реєстрації