Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Лекція №16

ФІЗИКА АТОМНОГО ЯДРА. ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ

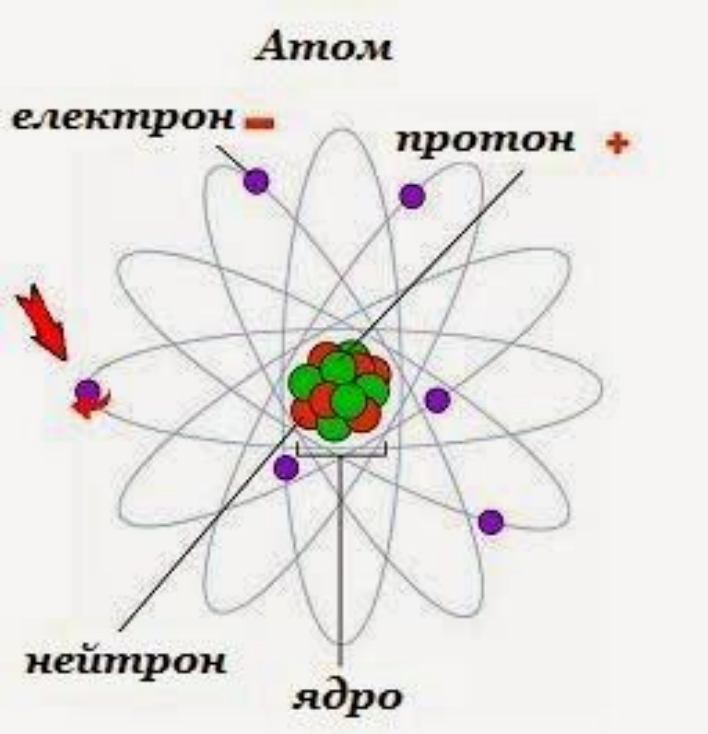
Викладач – проф. Шкурдода Ю.О..

Суми 2022

ФІЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

Резерфорд,
1911 р.

Бор,
1913 р.



Ядро - центральна частина атома, в якій зосереджена практично вся його маса і 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, спін ядра, магнітний і електричний моменти ядра, парність хвильової функції, ізотопічний спін, 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

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 періодичній таблиці .

- протон

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

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

- нейтрон

$$q_n = 0,$$

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

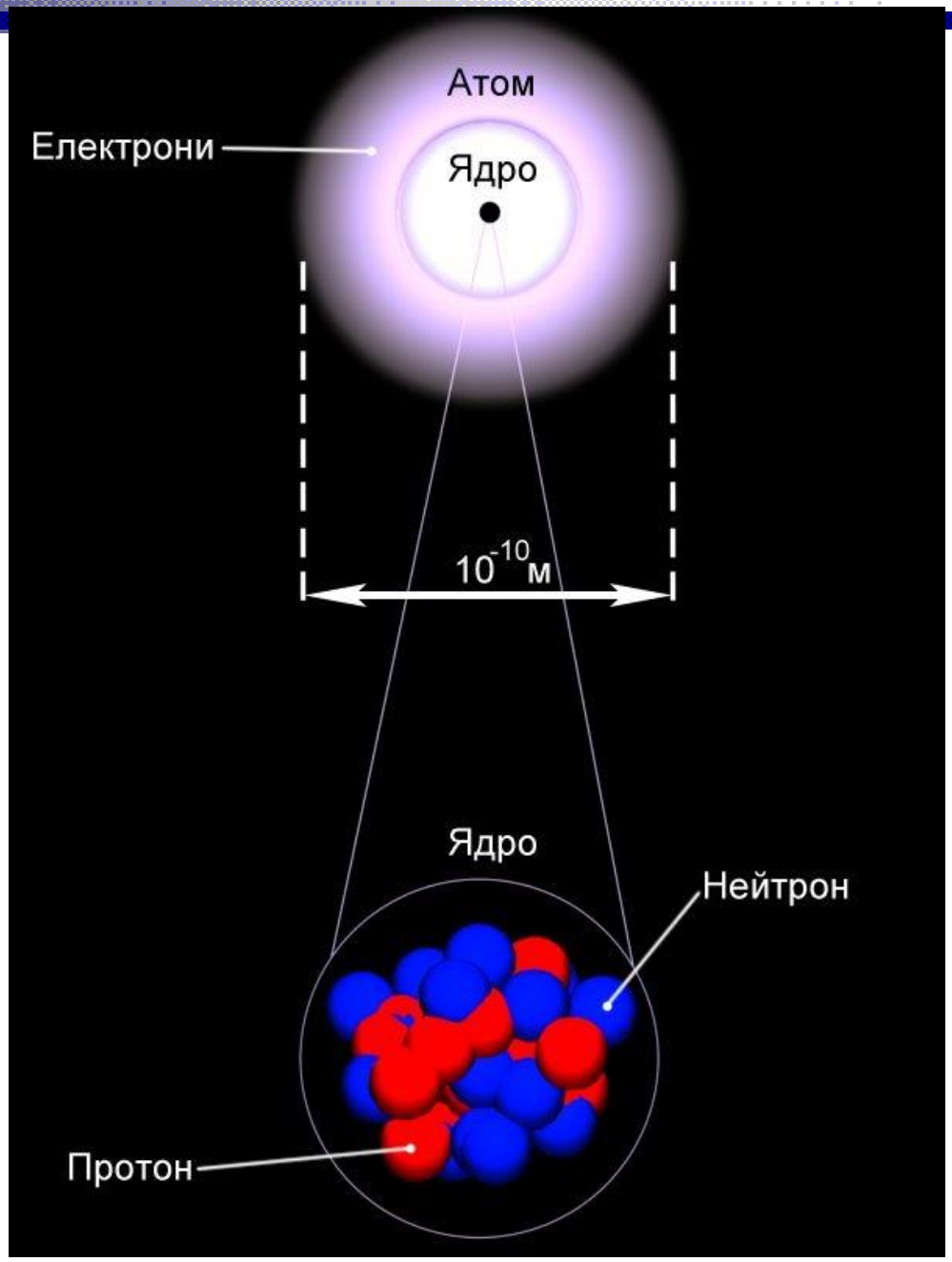
- ядро

$$m_p \approx m_n \approx 1 а.о.м.$$

Радіус ядра $R = 1,3 \times 10^{-15} \sqrt[3]{A}\ м$

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

$$A = Z + N$$


Атом
Електрони
Ядро
10^{-10}м
Ядро
Нейтрон
Протон

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

$$_{z}X^{A}, \quad або \quad ^{A}_{z}X$$

Наприклад $^{238}_{92}U$ *або* ^{238}U, $^{12}_{6}C$ *або* ^{12}C

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

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

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

Ізобари – це нукліди з однаковим масовим числом, але різним числом протонів. Наприклад, $^{3}H, ^{3}He$ - 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: $^{2}H, ^{3}He$

ЗАРЯД ЯДРА

$$q_я = Z \times |e|$$

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

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

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.

Джеймс ЧЕДВІК

1891 -1974

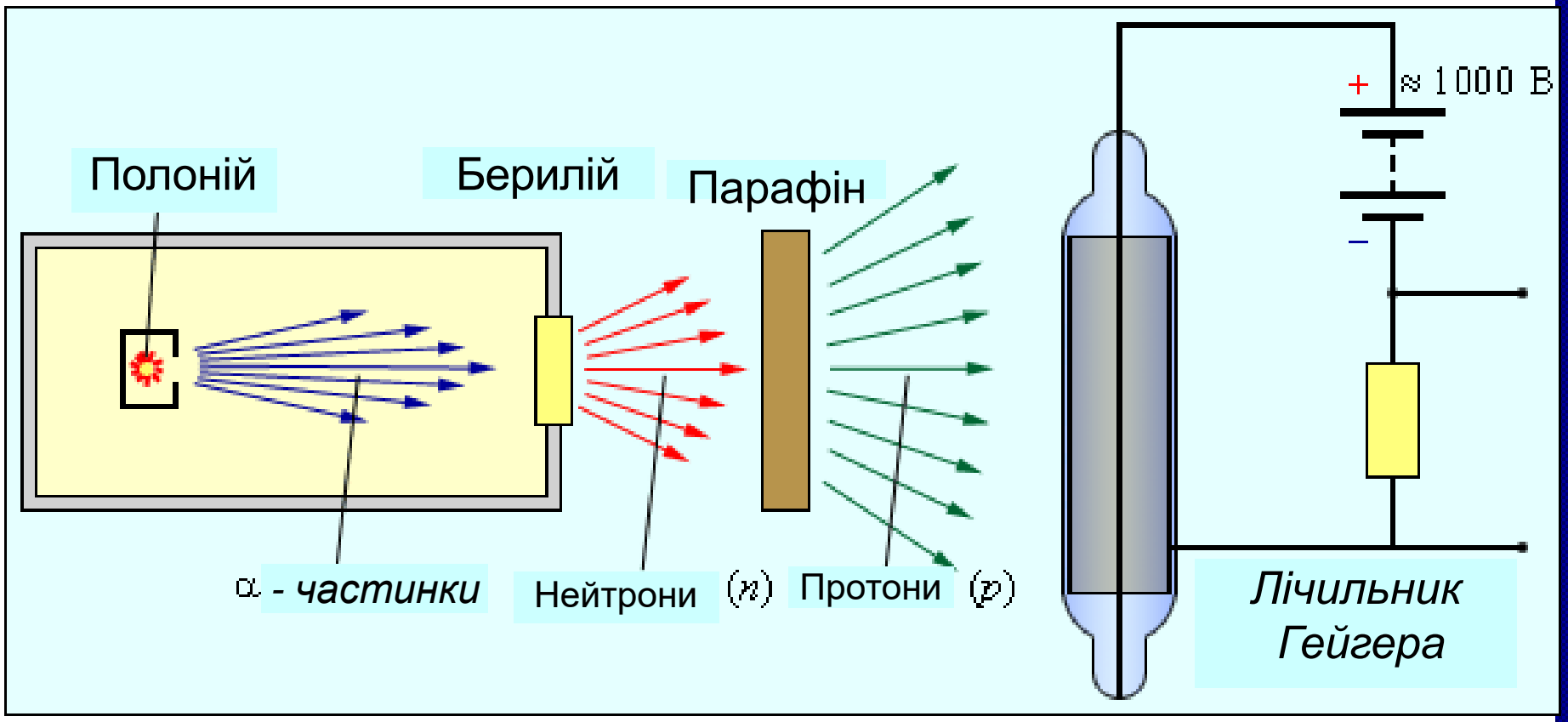
Лауреат Нобелівської премії за 1935 р. за відкриття нейтрона

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.

Схема установки для виявлення нейтронів *(дослід Чедвіка)*



При бомбардуванні берилію α-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 γ-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 γ-квантів, здатних при зіткненні надати протонам необхідну швидкість. Вона виявилася величезною – порядку 50 МеВ.

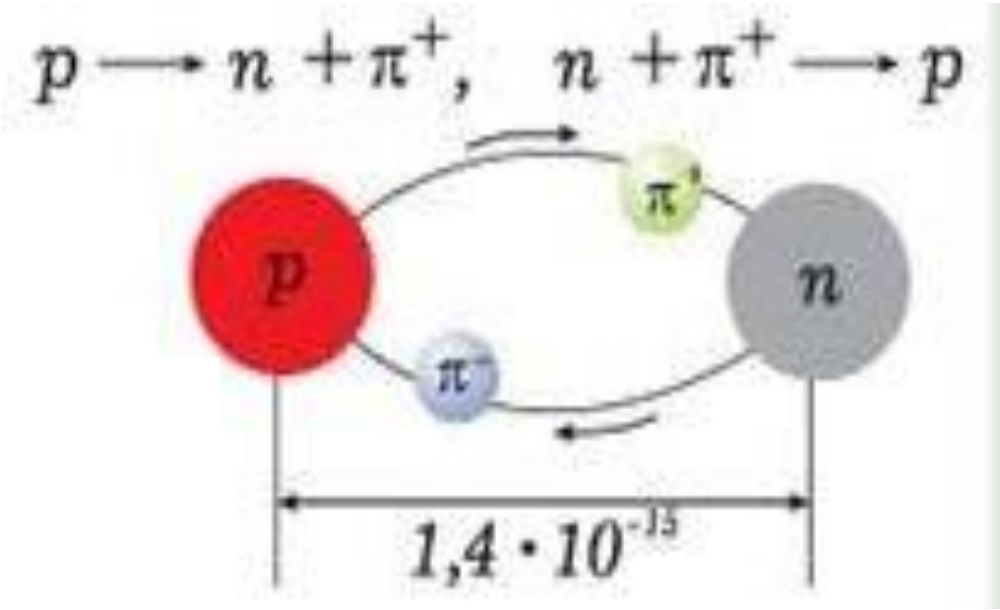
ЯДЕРНІ СИЛИ

Нуклони – ядерні сили – сильна взаємодія

Властивості ядерних сил

1. Ядерні сили – **близькодіючі.** 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 $\Delta m = Z \times m_p + N \times m_n - m_Я$
- Енергія зв'язку ядра $E_{ЗВ} = \Delta mc^2$

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

$$f = \frac{E_{ЗВ}}{A}$$

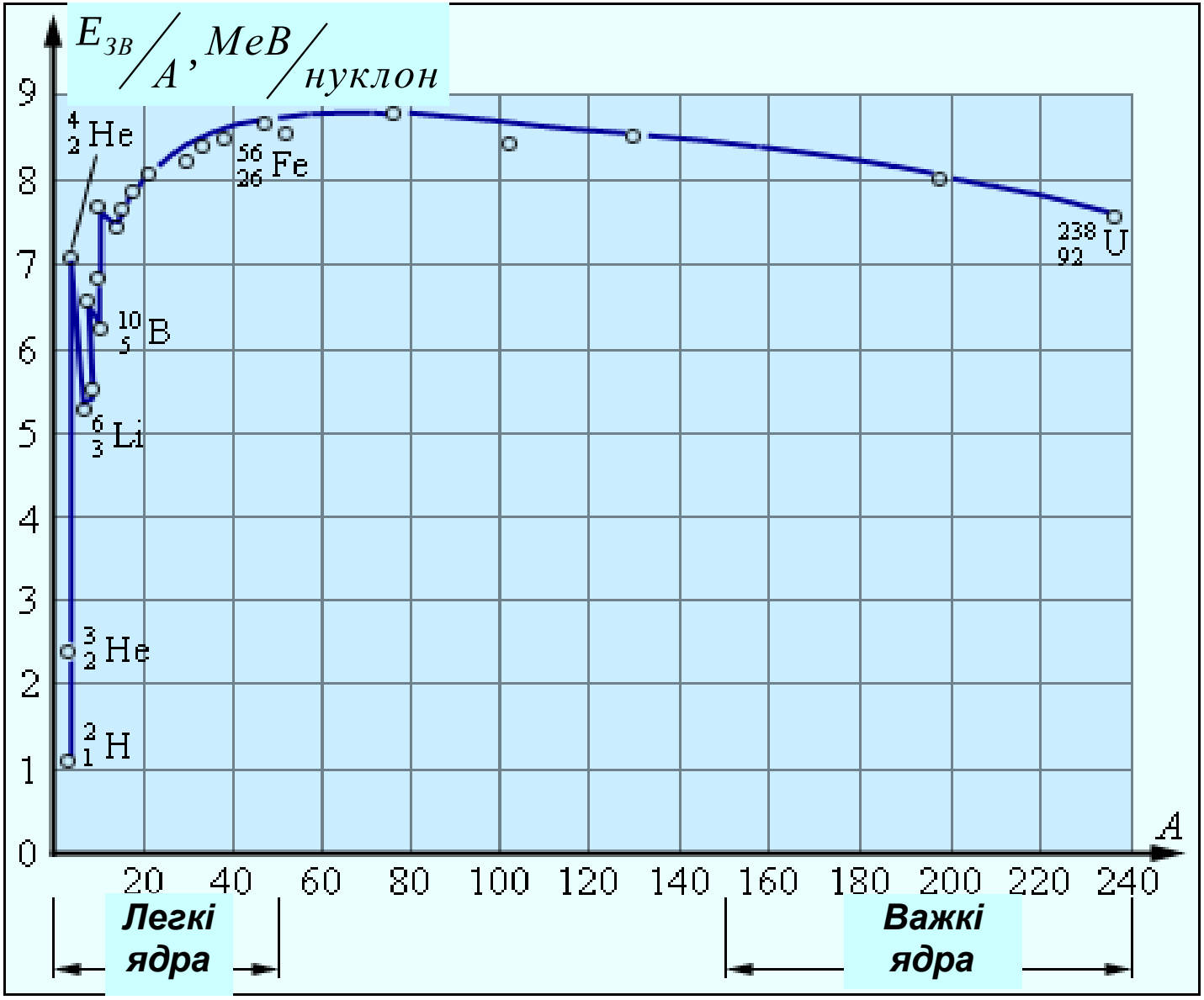
Енергетичні еквіваленти

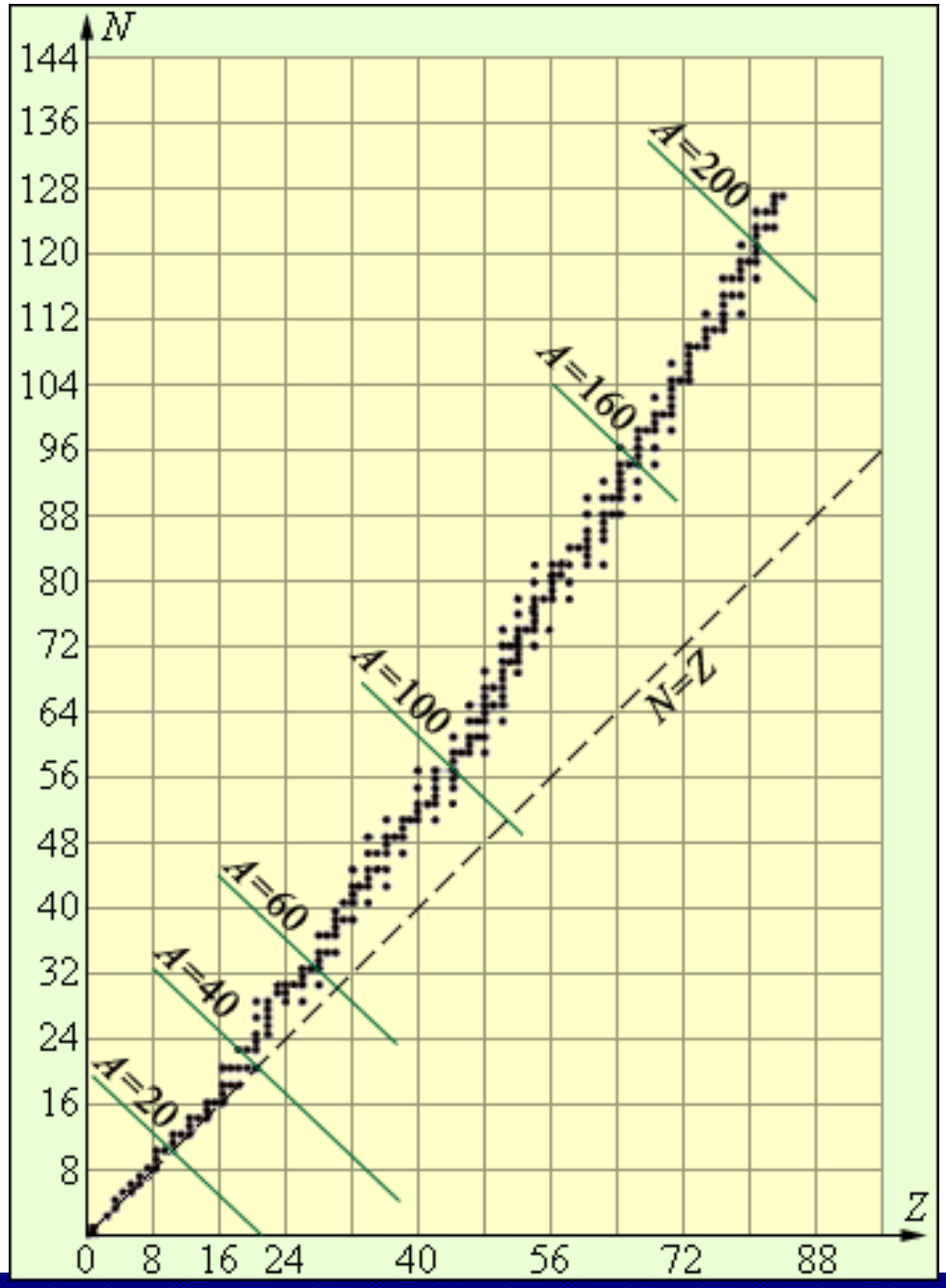
$$1 МеВ = 1,602 \times 10^{-13}\ Дж$$

$$1 а.о.м. \times c^2 = 931,4 МеВ$$

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;

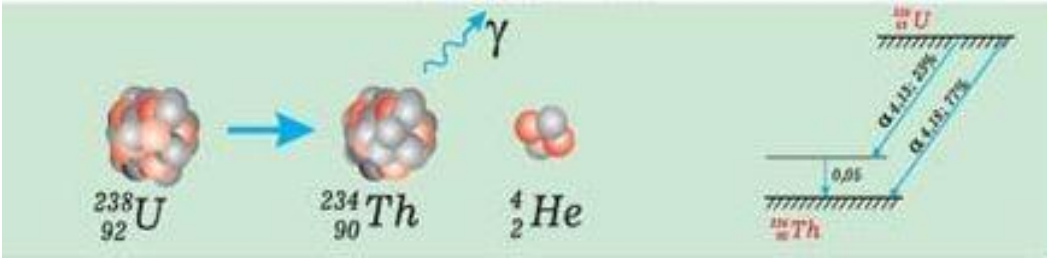
2)злиття легких ядер у більш важкі.

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.*

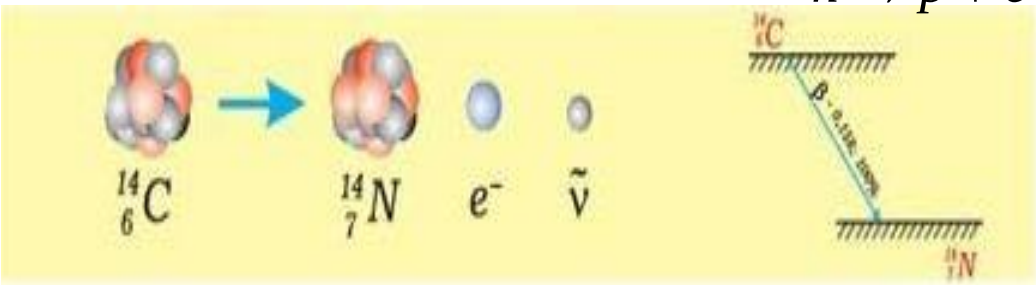
ВИДИ РАДІОАКТИВНОСТІ

1 Альфа - розпад



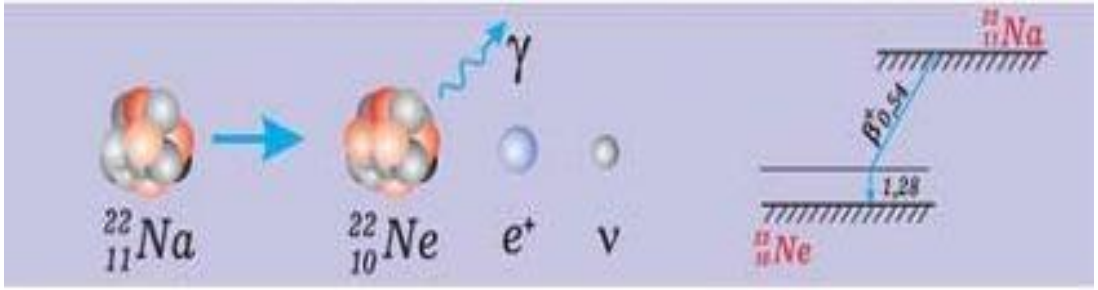
2 Електронний бета – розпад

$$n \rightarrow p + e^{-} + \nu$$



3 Позитронний бета - розпад

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu$$



ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ

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

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

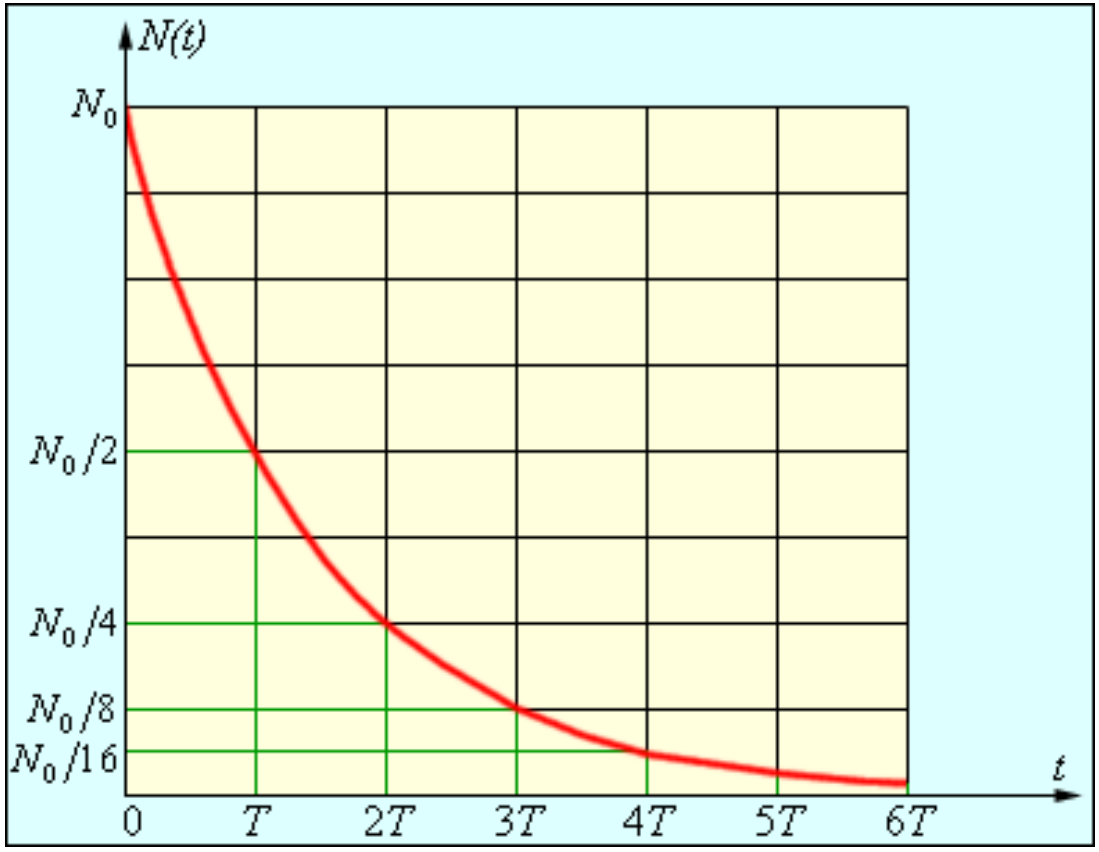
N – кількість ядер, що не розпалися у момент часу t

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

λ - стала розпаду

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

ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ



$$A = -\frac{dN}{dt}$$ - активність

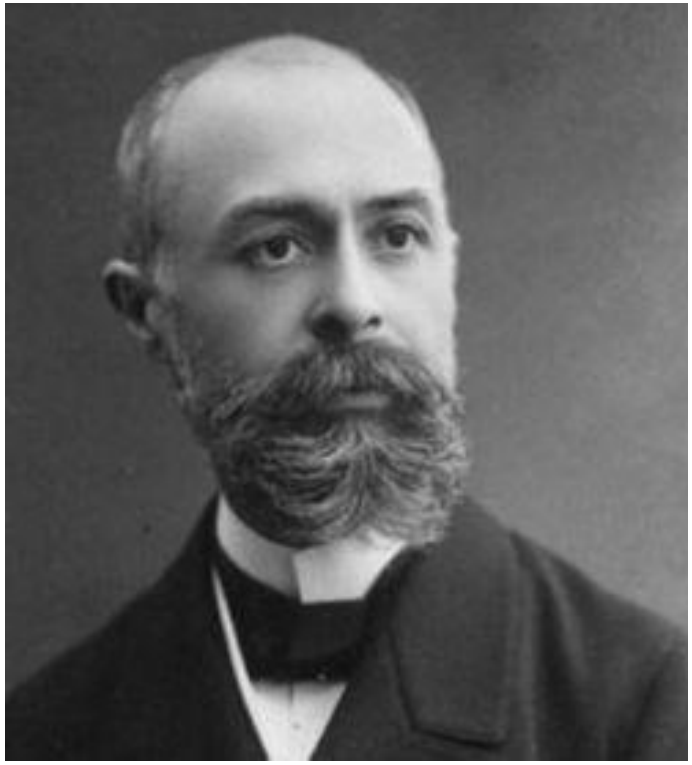
$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

$$A_0 = \lambda N_0$$

$$[A] = \frac{1 розпад}{1 c} = 1 Бк$$

$$1 Ku = 3,7 \times 10^{10} Бк$$

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’ЄР *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 працювавув 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.

СТРУКТУРА РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

$\alpha = {}^{4}_{2}He$ - альфа - частинка

$\beta = {}^{0}_{-1}e, \ {}^{0}_{1}e$ - бета - частинка

γ - жорстке електромагнітне випромінювання

ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ

Перша, здійснена людиною ядерна реакція

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

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

$Q = 17{,}6 MeB$

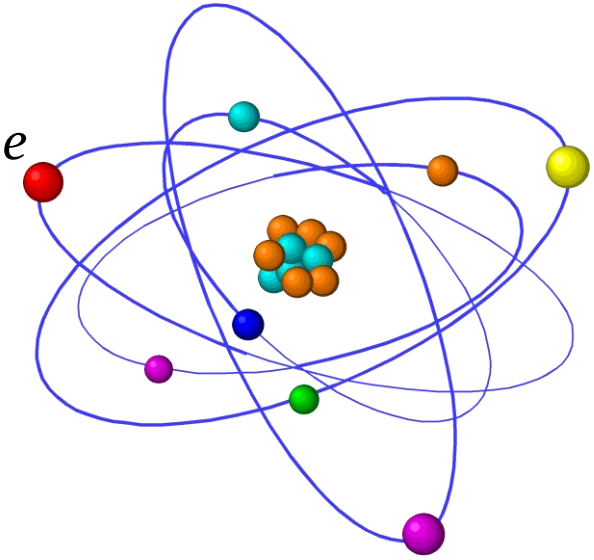
$$ {}_1H^2 + {}_1H^3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 + енергія $$

Термоядерний протон – протонний цикл, який відбувається в надрах зірок

$$ {}^1_1p + {}^1_1p \longrightarrow {}^2_1D + {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu_e $$

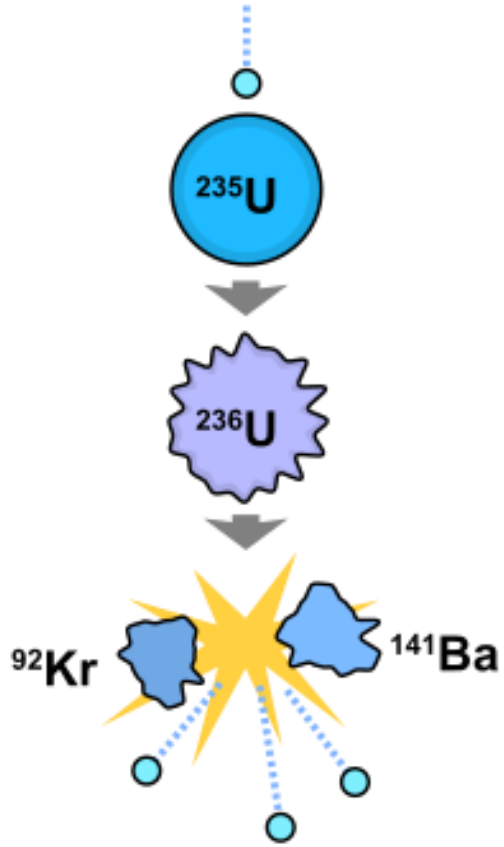
$$ {}^2_1D + {}^1_1p \longrightarrow {}^3_2He + \gamma $$

$$ {}^3_2He + {}^3_2He \longrightarrow {}^4_2He + 2{}^1_1p $$



ЯДЕРНИЙ ПОДІЛ

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



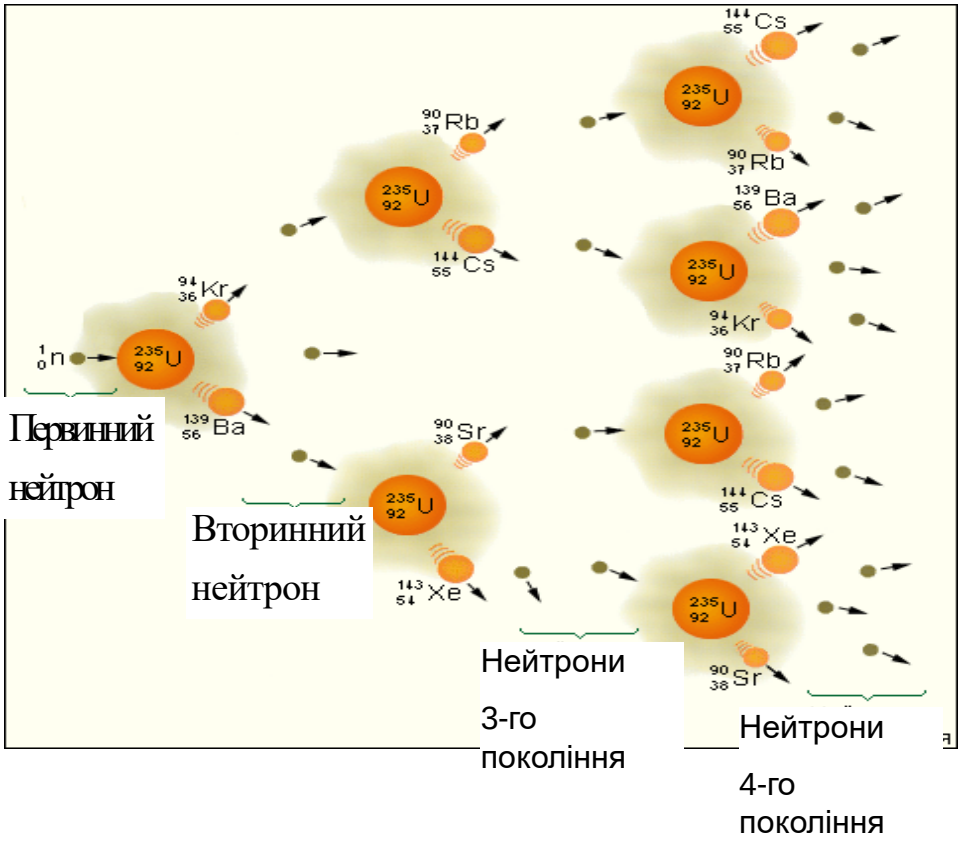
$$Q = 17,6\,MeB$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{140}_{55}Cs + ^{94}_{37}Rb + 2^{1}_{0}n$$

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

Радянський Союз – 1946 р., Курчатов

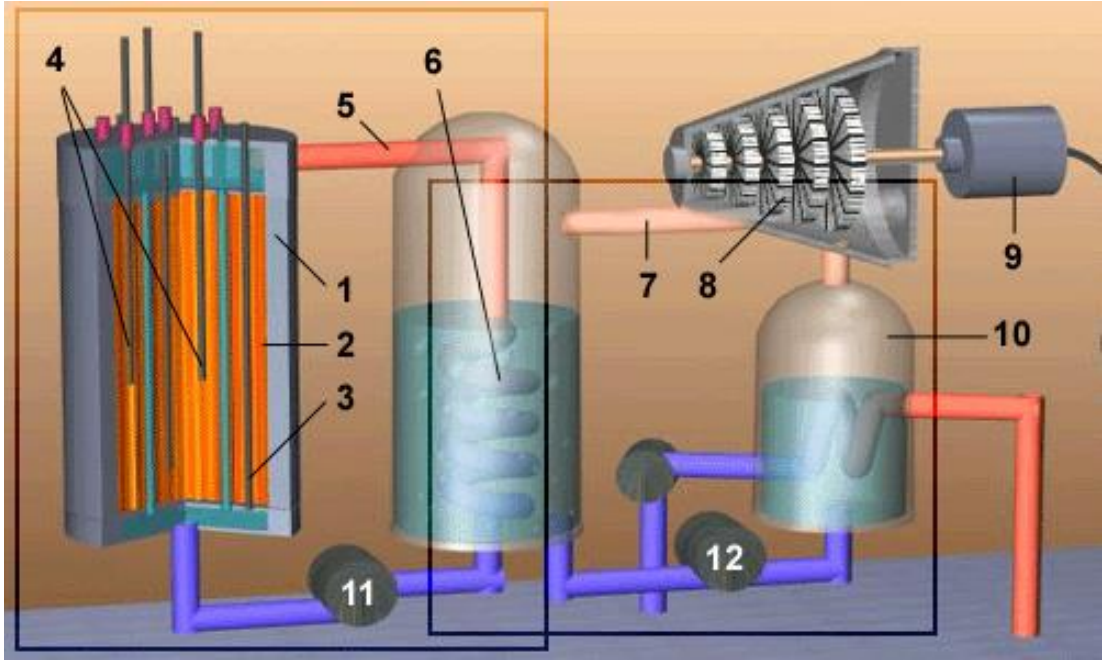
ЛАНЦЮГОВА ЯДЕРНА РЕАКЦІЯ



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

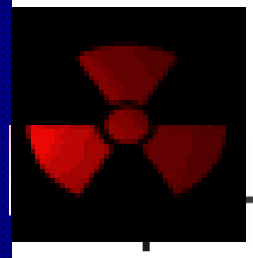
Уповільнювач нейтронів – важка вода

СХЕМА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА



Його захисний корпус 1 заповнений спеціальною речовиною 2 - сповільнювачем нейтронів. У ньому є вертикальні канали, в деякі з них опущені уранові стрижні 3, зібрані з окремих «таблеток». Їх загальна маса більше критичної, що дозволяє початися ланцюгової реакції. Для регулювання її швидкості між урановими стрижнями розташовані рухливі стрижні 4 з речовини, що поглинає нейтрони. Глибиною занурення цих стрижнів всередину реактора керують потужністю ланцюгової ядерної реакції.

Енергія, що виділяється в ході реакції, передається теплоносію - «важкій воді», що рухається через спеціальні вертикальні канали між стрижнями. У первинний контур циркуляції води 5 входить також «змійовик» всередині теплообмінника 6, заповненого звичайною водою вторинного контуру 7, яка при кипінні створює велику кількість пара. Він обертає лопаті турбіни 8 і одночасно ротор генератора 9. Після проходження турбіни пар потрапляє в конденсатор 10, де охолоджується і знову перетворюється в воду. Насоси 11 і 12 здійснюють незалежну циркуляцію важкої води в первинному контурі і звичайної води у вторинному контурі, підтримуючи безперервний теплообмін.



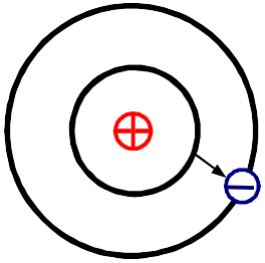
СТРУКТУРА РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

$\alpha = {}^{4}_{2}He$ - альфа – частинка

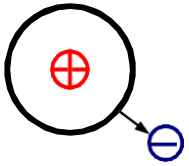
$\beta = {}^{0}_{-1}e, \ {}^{0}_{1}e$ - бета – частинка

γ - жорстке електромагнітне випромінювання

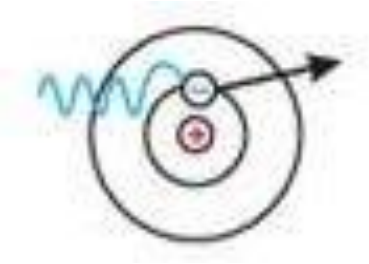
Основні процеси, які супроводжують проходження рентгенівського та гамма-випромінювання через речовину



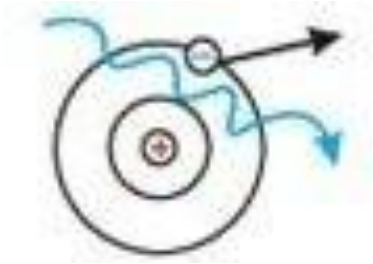
Збудження



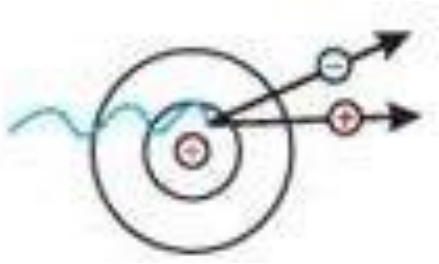
Іонізація



Фотоефект



Ефект Комптона



Народження пари

ВЛАСТИВОСТІ РАДОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

- **Проникна здатність** характеризується **пробігом** у повітрі
- **Іонізуюча здатність** визначається **питомою іонізацією** – кількістю пар іонів, утворених частинкою в повітрі на 1 см шляху. 1 пара - ~34 еВ
- **Інтенсивність іонізації** залежить і від природи речовини. Чим більший атомний номер і більша густина речовини, тим з більш великою кількістю електронів стикнеться частинка на одиничному шляху пробігу, тим більш інтенсивною буде іонізація і меншою глибина проникнення

ПОГЛИНАННЯ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ У РЕЧОВИНІ

Енергія гамма-квантів	Товщина шару речовини, яка послаблює потік гамма-випромінювання у десять разів		
	Вода	Бетон	Свинець
0,5МеВ	24 см	12 см	1,3 см
1,0МеВ	33 см	16 см	2,9 см
5,0МеВ	76 см	36 см	4,7 см

Альфа-частинки

Інтенсивна іонізація і невелика проникна здатність. Залежно від енергії пробіг у повітрі ~ 2,5 - 8 см. У біотканинах вони проникають на глибину до однієї десятої частки мм. Однак на своєму відносно незначному шляху пробігу в повітрі альфа-частинка разом із вторинними електронами створює від 100 до 250 тис. пар іонів. На 1см. пробігу це складає до 40 тис. пар іонів, що характеризується як винятково висока густина іонізації. **Захист** – паперовий екран.

Бета-частинки

Менш інтенсивна іонізація і значна проникна здатність. Залежно від енергії пробіг бета-частинок у повітрі має порядок від десятків см до декількох метрів. У тканинах організму бета-частинки проходять на глибину до 10-15 мм.

На шляху пробігу в повітрі бета-частинка створює від 1 до 25 тис. пар іонів, що складає до 40-50 пар іонів на 1 см пробігу.

Захист - плексигласовий або алюмінієвий екран товщиною в декілька мм.

ГАМА-ФОТОНИ
жорстке електромагнітне випромінювання

- **Висока проникна здатність.** Пробіг у повітрі - десятки і навіть сотні метрів. У біотканинах гамма- випромінювання проникає на велику глибину чи проходить наскрізь тіло людини. Первинна **іонізуюча здатність гамма-фотонів невисока**: на шляху пробігу гамма-фотон утворює від 10 до 250 пар іонів, що складає усього кілька пар іонів на 1 см пробігу. Однак повний іонізаційний ефект від гама випромінювання з урахуванням іонізуючої дії електронів, які були вибиті з атому при зіткненні з фотоном і отримали при цьому досить високу енергію, може бути дуже значним.
- **Захист** товсті шари землі, бетону і т.ін. чи важкі метали, такі як свинцевий екран товщиною в кілька см.

Одиниці СІ доз іонізуючого випромінювання

Найменування величини	Одиниці		
	Назва	Познач.	Визначення
Експозиційна доза опромінення	Кулон на кілограм	*Кл кг*	дорівнює експозиційній дозі рентгенівського та гамма-випромінювання, при якій у одному кілограмі сухого атмосферного повітря утворюються іони, електричний заряд кожного знаку яких дорівнює *1Кл*
Потужність експозиційної дози	Ампер на кілограм	*А кг*	дорівнює потужності експозиційної дози рентгенівського та гамма-випромінювання, при якій за час 1с сухому атмосферному повітрю передається експозиційна доза опромінення
Поглинена доза опромінення	Грей	*Гр*	дорівнює поглиненій дозі опромінення, при якій опроміненій речовині масою *1 кг* передається енергія іоніз. випромінювання *1 Дж*
Потужність поглиненої дози	Грей за секунду	*Гр с*	дорівнює потужності поглиненої дози опромінення при якій за час 1с опроміненою речовиною поглинається доза опромінення *1 Гр*
Еквівалентна доза опромінення	Зіверт	*Зв*	дорівнює еквівалентній дозі опромінення, при якій поглинута доза дорівнює *1Гр* і коефіцієнт ВБЕ дорівнює одиниці
Потужність еквівалентної дози	Зіверт за секунду	*Зв с*	дорівнює потужності еквівалентної дози опромінення , при якій за час 1с опроміненою речовиною поглинається доза еквів. доза *1 Зв*

Зв'язок одиниць дози опромінення СІ позасистемними одиницями

1 рентген $1P = 2,58 \times 10^{-4}\ Кл/кг$

Біологічний еквівалент рентгена (бер)

$$1бер = 0,01Зв$$

Експозиційній дозі 1Р рентгенівського та гамма-випромінювання відповідає еквівалентна доза $\approx 0,01Зв$

Фундаментальні взаємодії:

- **Сильна взаємодія** забезпечує зв'язок нуклонів у ядрі і ядерні реакції. Константа взаємодії, що характеризує її інтенсивність дорівнює 1, радіус дії 10^{-15} м.
- **Електромагнітна взаємодія**: константа взаємодії 10^{-2} , радіус взаємодії не обмежений.

Фундаментальні взаємодії:

- **Слабкою взаємодією** пояснюються всі види бета-розпаду, а також взаємодію нейтрино з речовиною. Константа взаємодії 10^{-13}. Ця взаємодія є короткодіючою, радіус дії 10^{-18} м. Слабка взаємодія - змінює внутрішню природу частинок.
- **Гравітаційна взаємодія -** універсальна, в мікросвіті її можна не враховувати, оскільки її константа дорівнює 10^{-38}. Радіус дії не обмежений.

Механізм взаємодій

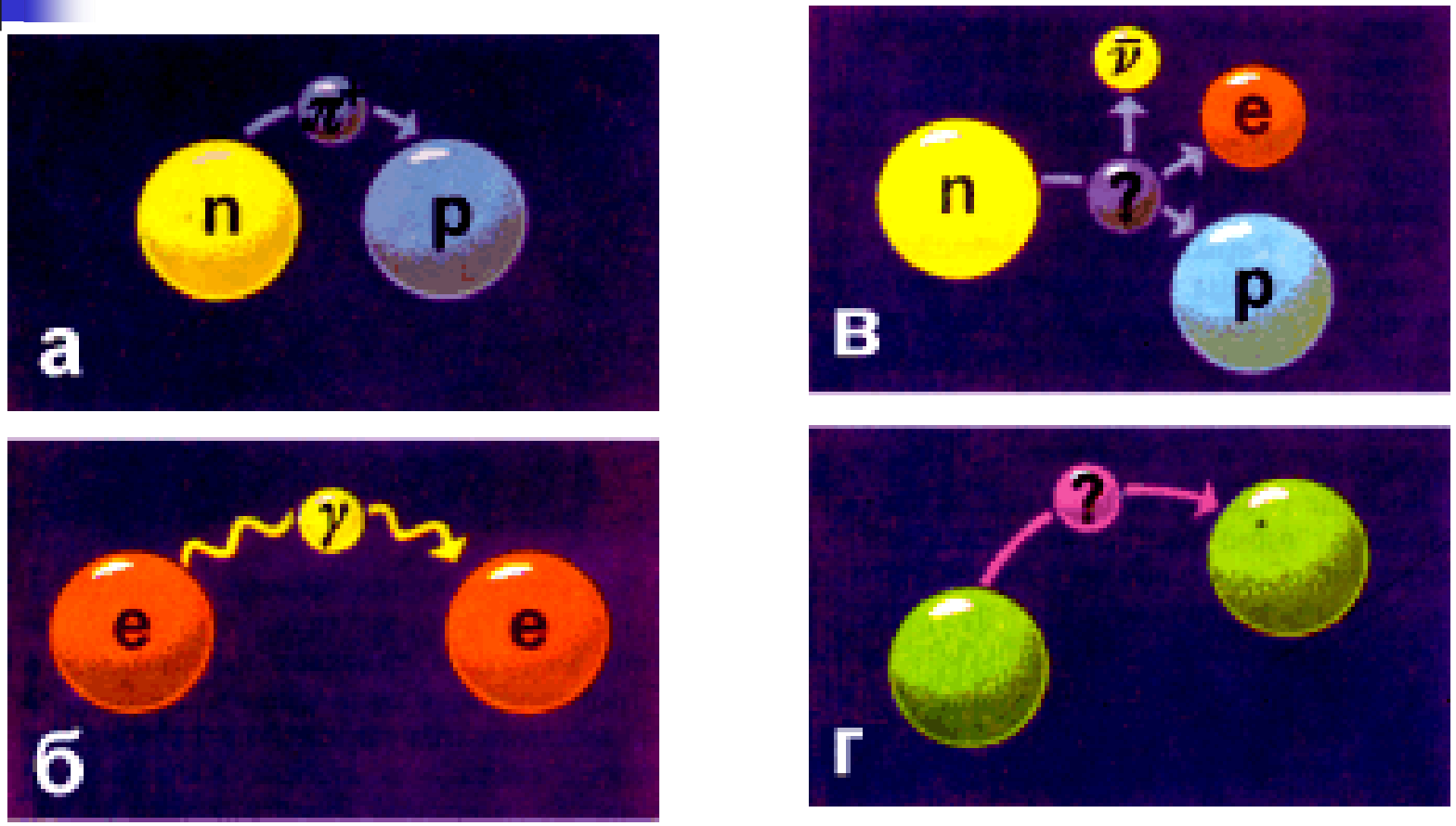
за рахунок **обміну частинками - переносниками взаємодії.**

Електромагнітна взаємодія - переносник - **фотон**.

Гравітаційна взаємодія - переносники - кванти поля тяжіння - **гравітони**. І фотони, і гравітони не мають маси (маси спокою) і завжди рухаються зі швидкістю світла.

Слабкі взаємодії - переносники - **векторні бозони**. Істотною відмінністю переносників слабкої взаємодії від фотона і гравітону є їх масивність. Переносники **сильних взаємодій - глюони** (від англійського слова glue - клей), з масою спокою, що дорівнює нулю

Механізм взаємодій



Властивості елементарних частинок

- **1 Здатність до взаємних перетворень.** Елементарні частинки здатні народжуватися й знищуватися.
- **2 Кожна елементарна частинка має античастинку**. Частинки відрізняються від античастинок тільки знаками зарядів, інші їх характеристики - тотожні.

Під час зіткнення частинки і античастинки відбувається їх **анігіляція** (зникнення), що супроводжується народженням фотонів великої енергії. Може протікати й зворотний процес – **народження** пари частинка-античастинка

Властивості елементарних частинок

- **3 Час життя.** Розрізняють стабільні, квазістабільні и нестабільні (резонанси) елементарні частинки. **Стабільні частинки:** фотон, електрон, протон і нейтрино.
- Нестабільні частинки через певні проміжки часу зазнають **самочинних** перетворень в інші частинки. Нестабільні частинки розрізняються за часом життя.
- **Квазістабілні** частинки розпадаються за рахунок електромагнітної та слабкої взаємодій. Час життя > 10^{-20} с (для вільного нейтрона навіть ~ 15 хв).
- **Резонанси** - елементарні частинки, які розпадаються за рахунок сильних взаємодій. часи життя 10^{-23} - 10^{-24} секунд

Властивості елементарних частинок

- **4 Маса та розмір.** Більшість мають масу близьку до маси протона. (помітно меншою є лише маса електрона).
- **5 Спін** є цілим або півцілим величини ħ. В цих одиницях спін пі- та К-мезонів дорівює 0, у протона, нейтрона и електрона =1/2, у фотона =
1. існують частинки з більшими спінами.

Властивості елементарних частинок

- **6 Електричний заряд.** Електричні заряди відомих Е. ч. є цілими кратними величині заряда електрона $1{,}6\times10^{-19}$ *Кл*, яка називається елементарним електричним зарядом.
- **Крім наведених властивостей елементарні частинки мають внутрішні квантові числа. Лептони – лептонний заряд, баріони – баріонний заряд і т. ін.**

Класифікація елементарних частинок

ЛЕПТОНИ				
Назва частинки	спін	Маса спокою, МеВ	Час життя, с	Електрич заряд, |e|
Електронне нейтрино ν_e **Електрон** e^-	**1/2** **1/2**	**0** **0,511**	**Стабільне** **Стабільний**	**0** **-1**
Мюонне нейтрино ν_μ **Мюон** μ^-	**1/2** **1/2**	**0** **106,6**	**Стабільне** **$2\cdot10^{-6}$**	**0** **-1**
Тау – нейтрино ν_τ **Тау – лептон** τ^-	**1/2** **1/2**	**<164** **1784**	**Стабільне** **$3\cdot10^{-12}$**	**0** **-1**

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!