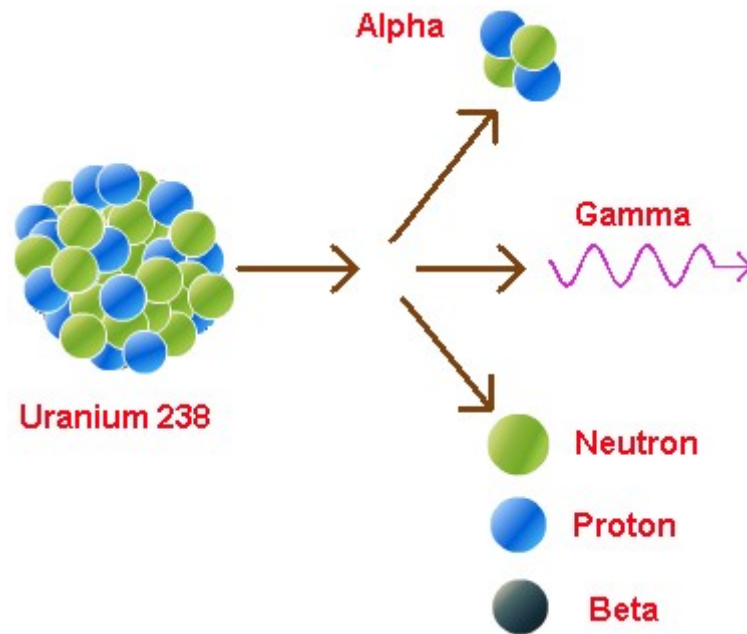


Nuclear and Particle Physics



Ч.8 Радіоактивність (Radioactivity, Nuclear Radiation)

Суть явища і властивості ядерної радіоактивності

- Радіоактивність — спонтанний розпад ядер з випромінюванням однієї або кількох частинок
 - Необхідною умовою радіоактивного розпаду є його енергетична вигідність: маса радіоактивного ядра повинна перевищувати суму мас продуктів розпаду.
 - Радіоактивність — процес статистичний. Однакові ядра розпадаються за різний час. Не можна передбачити коли розпадеться дане конкретне ядро. Ядра не старіють.
 - Але середній час життя (час життя) ядер одного сорту є фізичною характеристикою розпаду і не залежить від способу одержання цих ядер і від зовнішніх умов (температура, тиск...). Позасистемна одиниця вимірювання активності — 1 Кюрі
- $$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп./с}$$
- Нема чіткої межі між ядерними реакціями (через компаунд-ядро) і радіоактивним розпадом. На практиці — визначальними є можливості радіотехнічних методів: від наносекунд до 10^{22} років

Властивості ядерної радіоактивності

- Спостерігається **чотири** основних типи радіоактивності: α -розпад, β -розпад, γ -розпад і спонтанне ділення на уламки.
- До рідких типів радіоактивності відносять випромінювання двох протонів або кластерів ядер, таких як вуглець-12 або сірка-32.
- Процес радіоактивного розпаду завжди **екзотермічний** — протікає із виділенням енергії.
- Більшість радіоактивних ядер в природі не зустрічається, а **синтезується** в лабораторіях. Довгоживучих ядер, які існують з часів утворення Всесвіту, близько **20**. Найважливіші з них — уран-235 та 238, а також торій-232.

- За означенням константи розпаду λ , кількість розпадів за час dt в інтервалі часу $t + dt$
(*)
$$dN = -\lambda N dt$$

мінус означає, що кількість ядер зменшується в результаті розпаду.

- Основний закон радіоактивного розпаду (після інтегрування (*))

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

N_0 - кількість ядер в початковий момент часу, $N(t)$ — кількість ядер, які залишилися в момент часу t .

- Кількість ядер, які розпалися за час t

$$N_0 - N(t) = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

- Для двох частинок ймовірність спостерігати 0, 1 і 2 розпади за час t

$$\begin{aligned} w_0 &= e^{-\lambda t} e^{-\lambda t} = e^{-2\lambda t}, \\ w_1 &= 2e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t}), \\ w_2 &= (1 - e^{-\lambda t})^2. \end{aligned}$$

Радіоактивність

- Для N частинок середнє число ядер, яке розпадеться за час t

$$\bar{n}(t) = N\lambda t$$

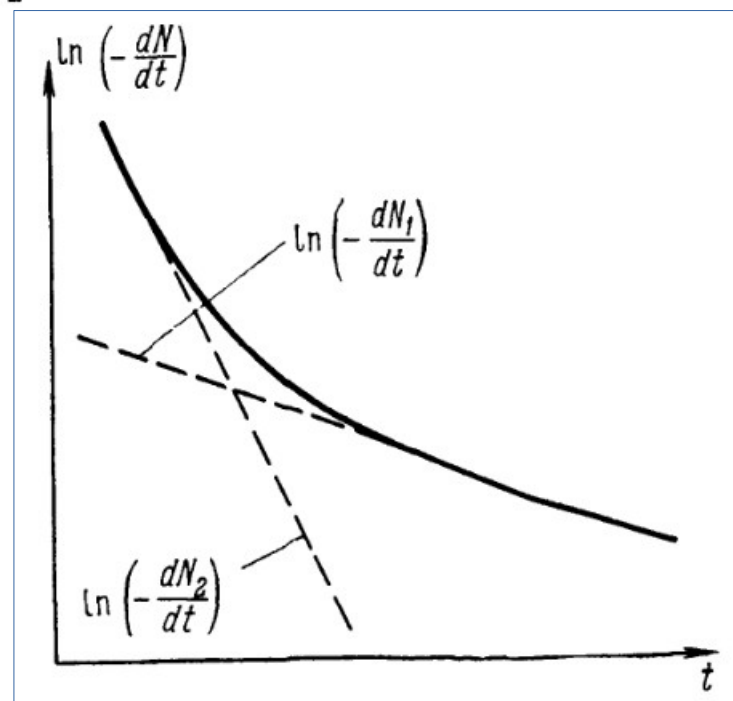
- Тобто, середня активність

$$\mathcal{A} = \bar{n}/t = N\lambda$$

- Якщо препарат містить два типи радіоактивних ядер, то загальна кількість радіоактивних ядер буде змінюватись з часом як

$$N = N_1 e^{-\lambda_1 t} + N_2 e^{-\lambda_2 t}$$

- Графік буде мати дві приблизно прямолінійні ділянки на логарифмічній шкалі, по яким можна визначити обидва періоди напіврозпаду



Складний розпад

- Складний розпад може трапитись і при розпаді одного сорту ядер, якщо продукт розпаду сам виявляється радіоактивним: наприклад, ядро 1 розпадається на 2, а 2 — на 3.
- В цьому випадку зміну числа ядер 1 і 2 визначають системою рівнянь

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1.$$

- Якщо в початковий момент ядер 2 нема

$$N_1(0) = N_{10}, \quad N_2(0) = 0$$

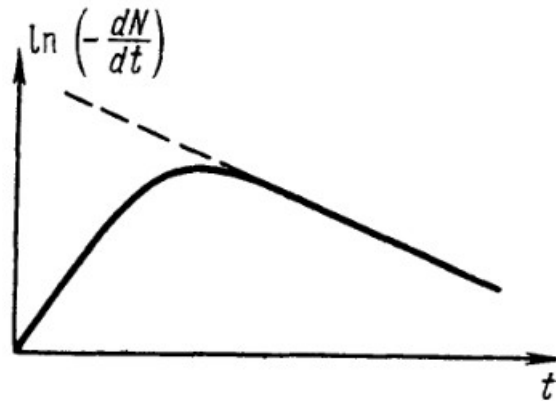
то рішення матиме вигляд

$$N_1 = N_{10}e^{-\lambda_1 t}, \quad N_2 = \frac{N_{10}\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Крива логарифму активності у випадку, коли перше ядро більш короткоживуче матиме вигляд, як на попередньому слайді 4 (розпад двох ізотопів із різними періодами).

Складні розпади

- Якщо більш довгоживучим є перший розпад, тоді графік активності не буде монотонним, а матиме максимум. Початковий підйом пояснюється накопиченням більш активних ядер 2.



- Через деякий час (після максимуму) вкладом другої експоненти можна знехтувати і настає радіоактивна рівновага, при якій співвідношення між ядрами 1 і 2 вже не залежить від часу:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} \quad (\lambda_1 t \gg 1)$$

- Тобто, активності обох ядер стають однаковими

Вікова рівновага

- Якщо є кілька послідовних розпадів $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow \dots$, і період напіврозпаду ядра 1 набагато перевищує решту ядер, встановлюється **вікова рівновага** кількість ядер кожного ізотопу буде пропорційна періоду напіврозпаду

$$N_1 : N_2 : N_3 : \dots = T_{1/2}^{(1)} : T_{1/2}^{(2)} : T_{1/2}^{(3)} : \dots$$

- Наприклад, для радію-226 $T_{1/2}(\text{Ra}) = 1,62 \cdot 10^3$ років. Тому в 1 г урану міститься $3,4 \cdot 10^{-7}$ г радію оскільки відношення до часу життя урану складає $3,4 \cdot 10^{-7}$.

α-розпад

- Важкі ядра можуть випускати альфа-частинки. При цьому атомний номер зменшується на 2 одиниці, а масове число — на 4. Необхідною умовою альфа-розпаду є співвідношення мас

$$M(A, Z) > M(A - 4, Z - 2) + M_{\alpha}$$

- Початкове ядро називають **материнським**, а кінцеве — **дочірнім**.
- Основними характеристиками є період напіврозпаду (або час життя) і енергія частинок.
- Цей розпад властивий тільки **важким** ядрам. Відомо більше **200** альфа-активних ядер.
- В основному це ядра із **$Z > 82$** , тобто не менше 1-2 протонів **понад замкнуту оболонку**, яка має магічне число 82.
- Також невелика група атомів в районі рідких земель **$A = 140 — 160$** . Самий легкий в природі альфа-активний ізотоп — ядро **церію-142** із 84 нейтронами.

Альфа-розпад

- Сумарна кінетична енергія альфа-розпаду (кінетична енергія кінцевого ядра і альфа-частинки)

$$Q_\alpha = [M(A, Z) - M(A - 4, Z - 2) - M_\alpha] c^2$$

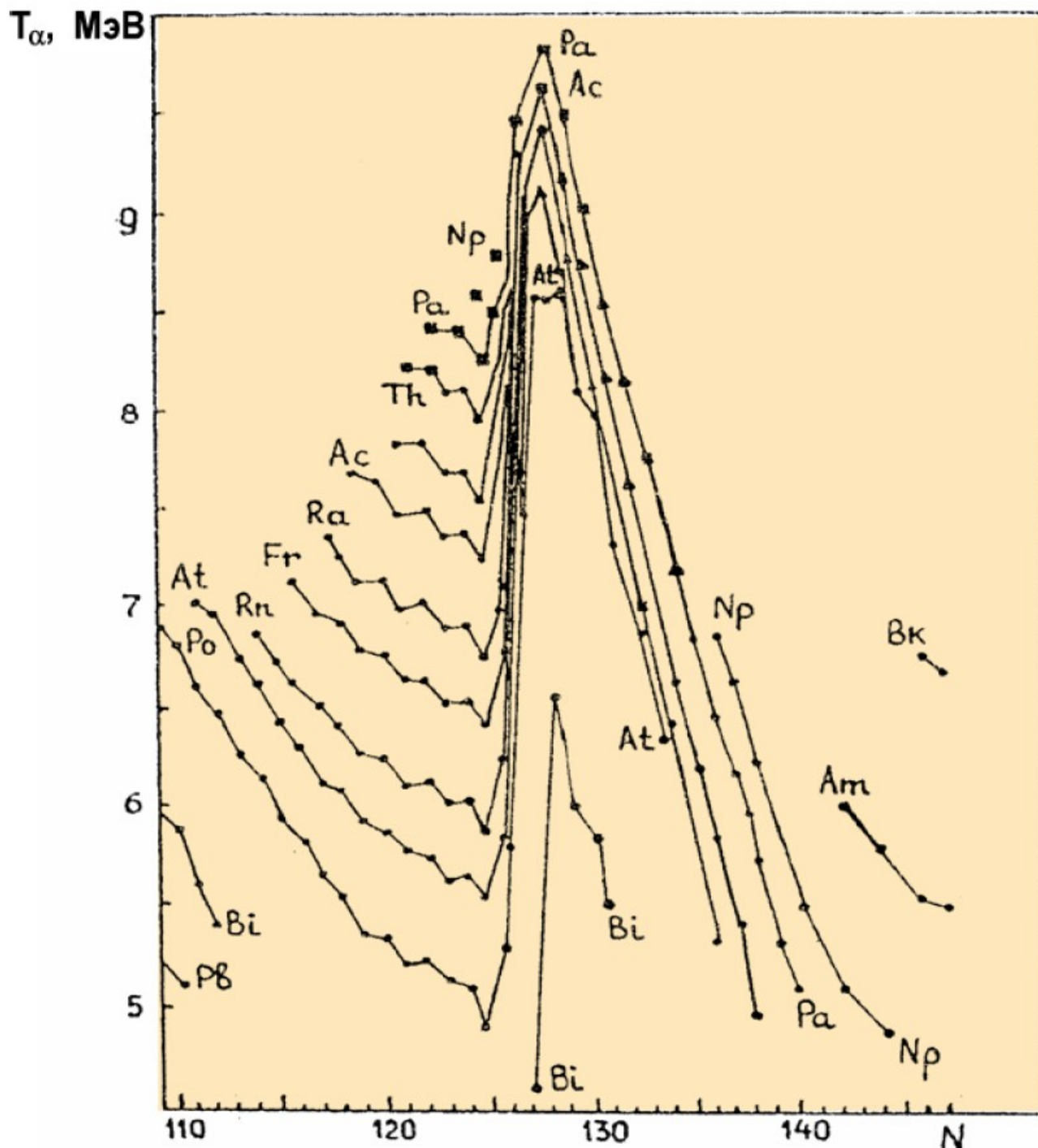
- Із законів збереження імпульсу і енергії кінетична енергія альфа-частинки дорівнює

$$T_\alpha = Q_\alpha \frac{M(A - 4, Z - 2)}{M(A - 4, Z - 2) + M_\alpha}$$

- Періоди напіврозпаду варіюються в широких межах від мікросекунд до 10^{17} років. Енергії альфа-частинок знаходяться в досить жорстких межах від 4 до 9 MeV для важких ядер і 2 - 4.5 для легших ядер в області рідких земель.
- Альфа-розпад відбуваються в результаті сильної взаємодії

Енергія альфа-частинок в районі $N=128$

В залежності енергії альфа-частинок від числа нейтронів яскраво проявляються оболонкові ефекти. При $N=128$ — сильно зв'язане магічне ядро.



Залежність періодів напіврозпаду від енергії

- Найбільш яскравою властивістю альфа-розпаду є **сильна залежність періоду напіврозпаду від енергії частинок**. Зменшення енергії на 1% може викликати подовження часу життя в 10 разів! А зменшення на 10% - змінює час життя на 2-3 порядки.
- Ще 100 років назад був встановлений закон Гейгера-Неттола

$$\log T_{1/2} = C + D/\sqrt{E}$$

С і D — константи, які не залежать від A і мало залежать від Z

$$Z = 84 \quad C = -50,15, \quad D = 128,8$$

$$Z = 90 \quad C = -51,94, \quad D = 139,4$$

Для $74 \leq Z \leq 106$ дані добре апроксимуються залежністю

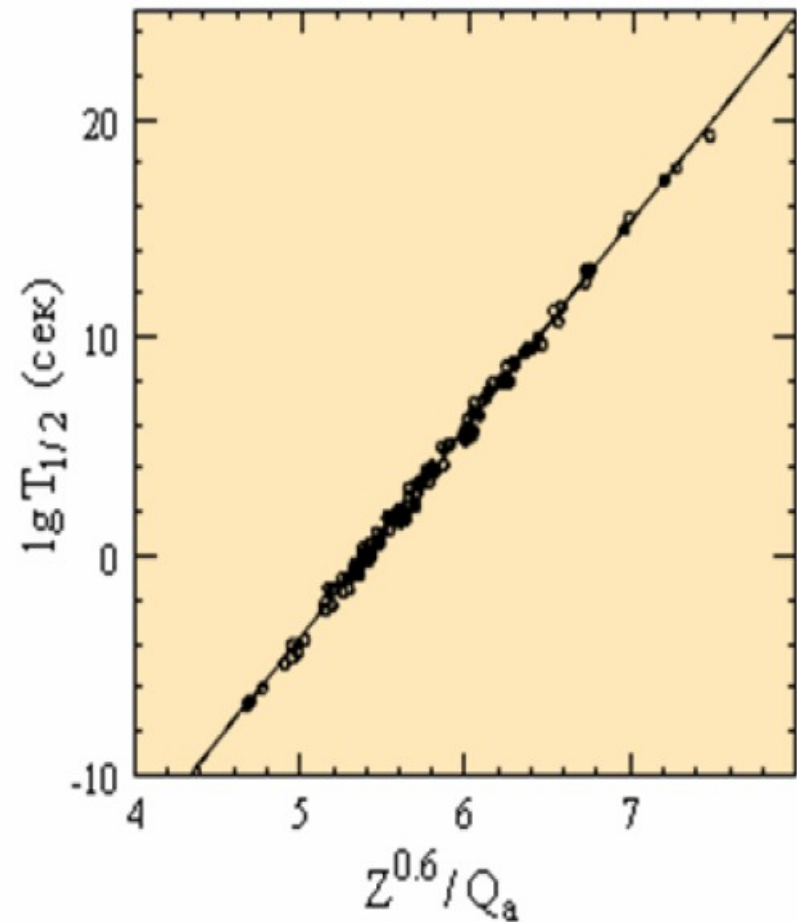
$$\lg T_{1/2} = \frac{9,54Z^{0,6}}{Q_\alpha^{1/2} - 51,37}$$

Сильна залежність альфа-розпаду від енергії обумовлена ймовірністю проходження альфа-частинкою потенційного бар'єру.

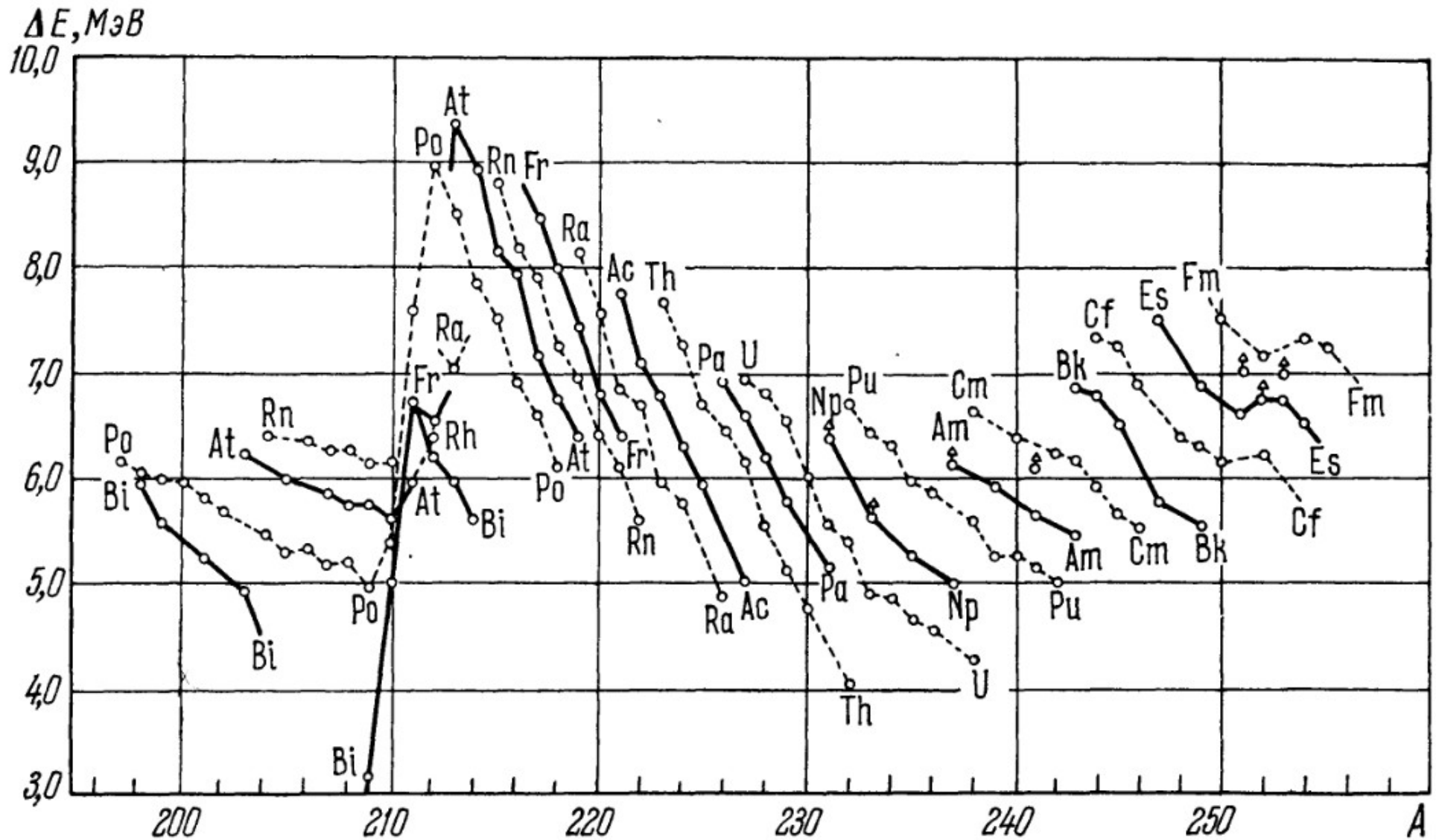
Наприклад, проходження прямокутного 20 МеВ бар'єру на відстані 10 фм відповідає коефіцієнту проходження

$$P = e^{-84} \approx 10^{-36}$$

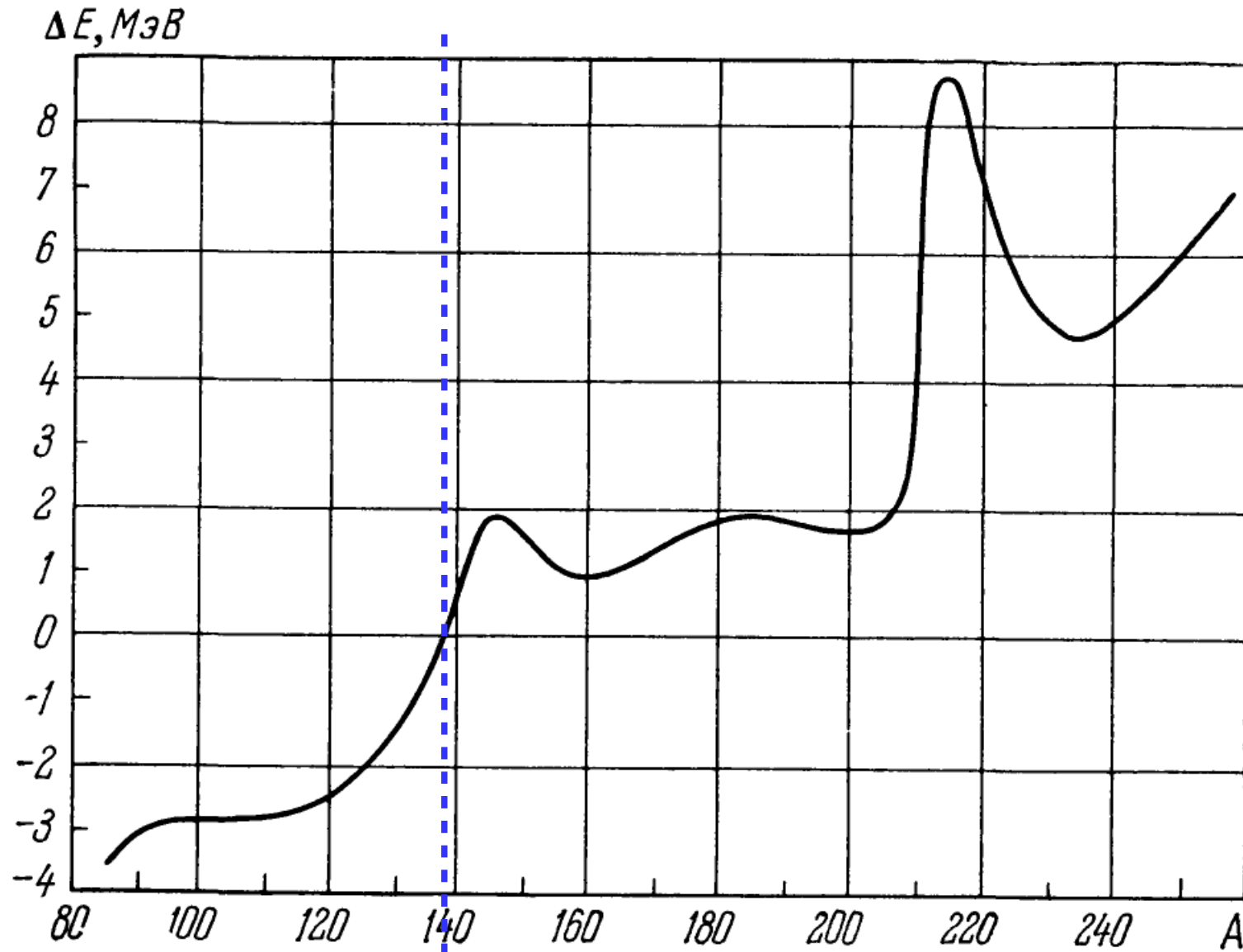
Тоді при частоті ударянь об стінку бар'єру $\sim 3 \cdot 10^{21}$ Гц одержимо період напіврозпаду близько 10 мільйонів років.



Енергія альфа-частинок як функція масового числа A



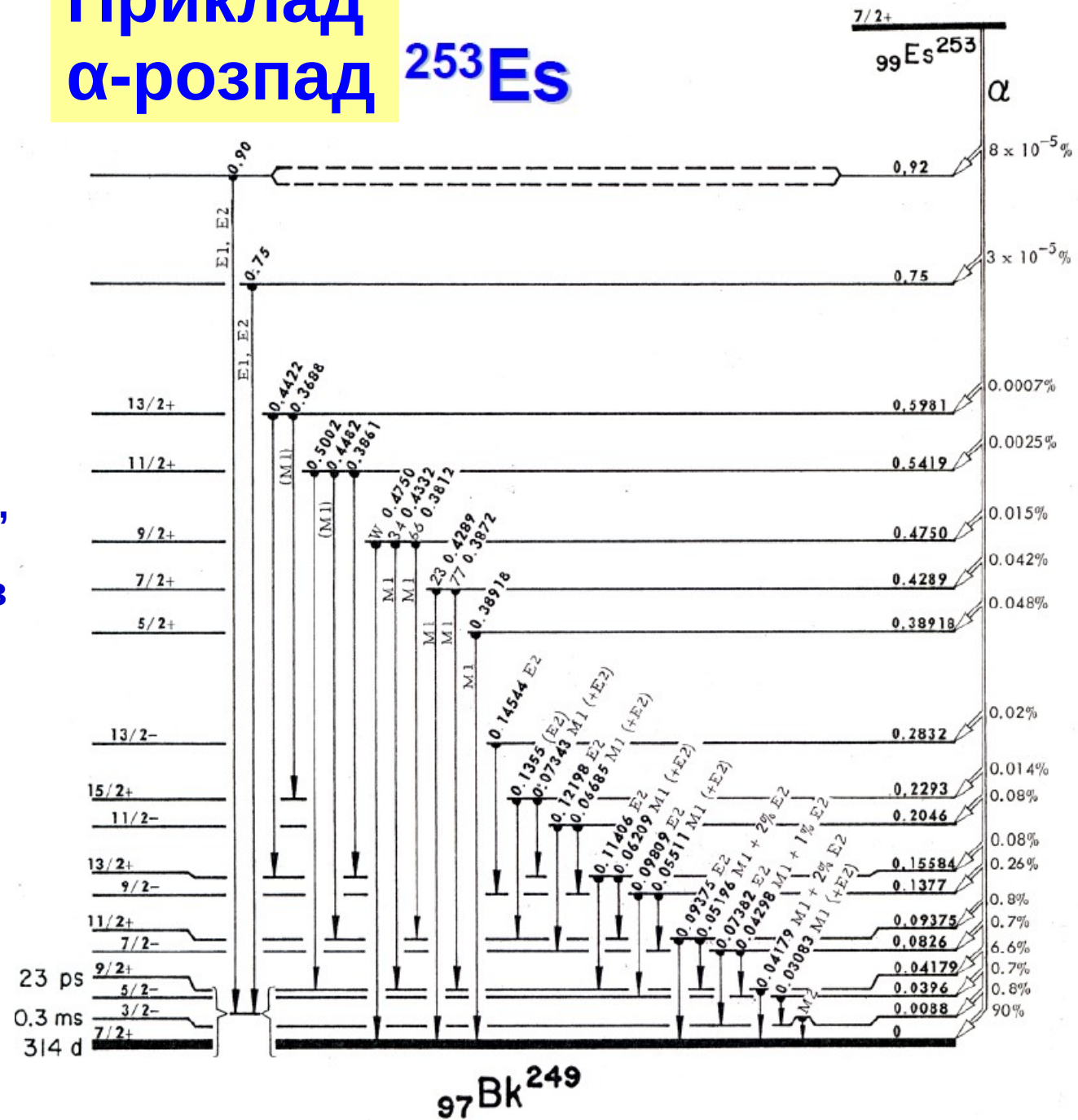
Енергія альфа-частинок як функція масового числа A



Стає можливим альфа розпад

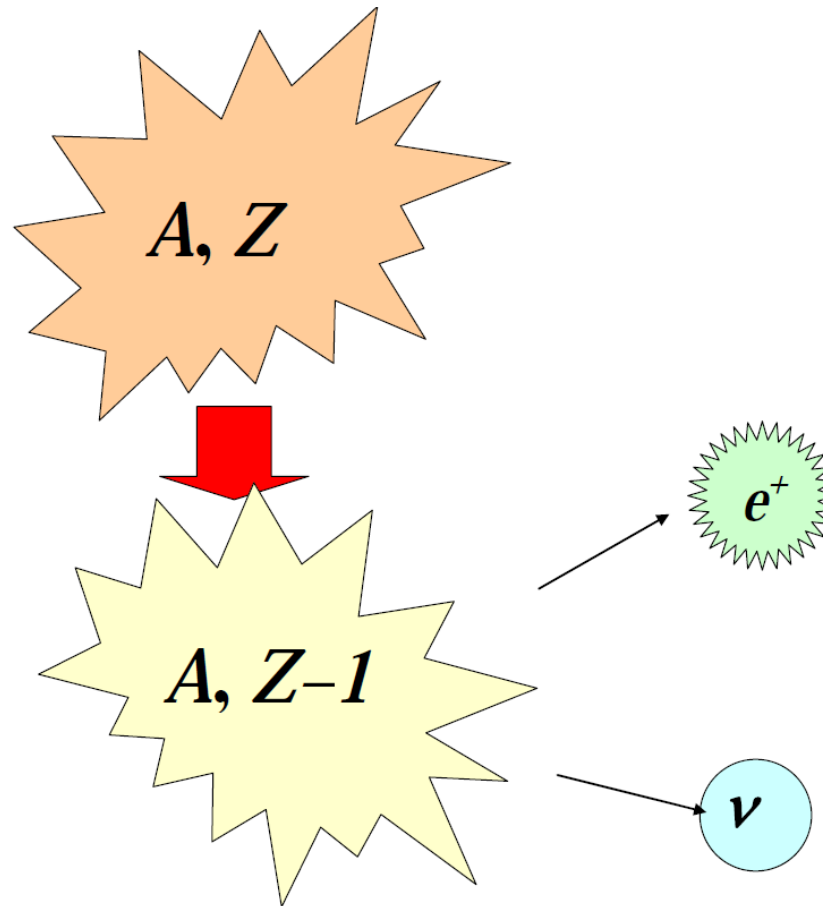
Приклад α -розпад ^{253}Es

Через сильну залежність від енергії, розпади на збуджені стани відбуваються із малою ймовірністю. Бо тоді зменшується енергія альфа-частинок



β - розпад

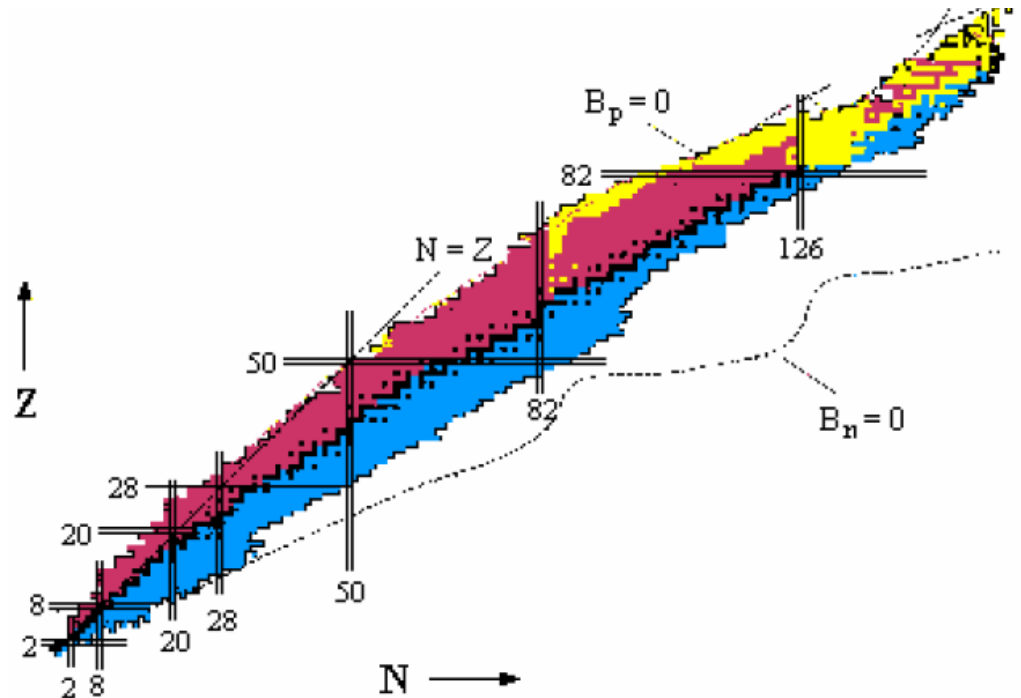
Спонтанне перетворення ядра (A, Z) в ядро ізобар $(A, Z \pm 1)$ в результаті випромінювання лептонів (електронів, позитронів і нейтрино), або захоплення електрону із випромінюванням нейтрино.



- β -розпад спостерігаються в усіх областях масових чисел A : від вільного нейтрона до важких ядер.
- Стабільні відносно β - розпаду ядра розташовані близько значень $Z_{\text{равн}}$

$$Z_{\text{равн}} = \frac{A}{0,015A^{2/3} + 2}$$

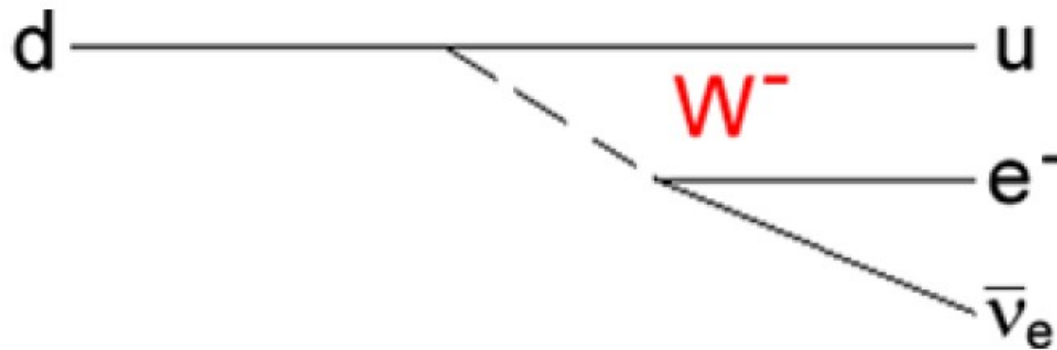
- β - розпад часто відбувається також на збуджені стани ядер



При	$Z < Z_{\text{равн}}$	ядро	нестабильно e^-
	$Z > Z_{\text{равн}}$	ядро	нестабильно e^+

β - розпад

- β - розпад відбувається завдяки **слабим взаємодіям**. На кварковому рівні відбувається перетворення d-кварка в u-кварк, або u-кварка в d-кварк.
- На нуклонному рівні це відповідає **перетворенню нейтрона в протон** або навпаки. При цьому, нейтрон може перетворюватись в протон у вільному стані, а протон в нейтрон — тільки для протонів, зв'язаних в ядрі.



Енергія β - розпаду

- В процесі β - розпаду виділяється енергія

$$Q_{\beta^-} = [M^{\text{Я}}(A, Z) - M^{\text{Я}}(A, Z+1) - m_e] c^2$$

$$Q_{\beta^+} = [M^{\text{Я}}(A, Z) - M^{\text{Я}}(A, Z-1) - m_e] c^2$$

$$Q_{e^-3} = [M^{\text{Я}}(A, Z) + m_e - M^{\text{Я}}(A, Z-1)] c^2$$

- Але в довідниках часто наводяться маси атомів, тому для енергій β - розпаду користуються співвідношеннями

$$Q_{\beta^-} = [M^{\text{ат}}(A, Z) - M^{\text{ат}}(A, Z+1)] c^2$$

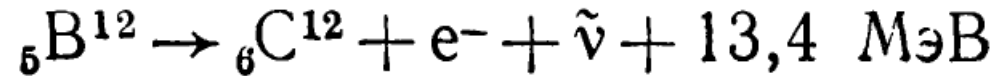
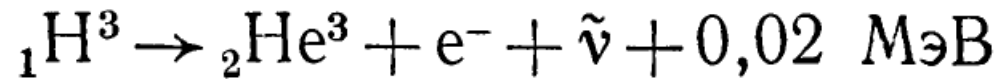
$$Q_{\beta^+} = [M^{\text{ат}}(A, Z) - M^{\text{ат}}(A, Z-1)] c^2 - 2m_e c^2$$

$$Q_{e^-3} = [M^{\text{ат}}(A, Z) - M^{\text{ат}}(A, Z-1)] c^2$$

- Енергію β - розпаду виносять в основному легкі лептони (електрони, позитрони, нейтрино)

Енергія β - розпаду

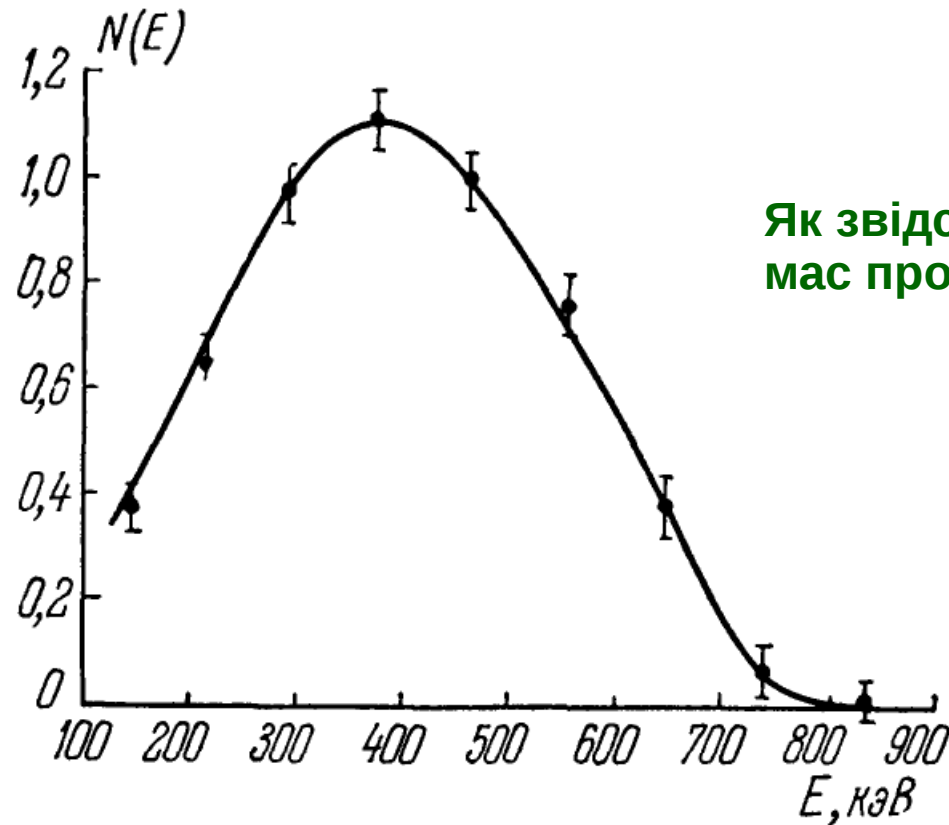
- Виділена в одному розпаді енергія варіюється в широких межах від 20 кеВ до 13.4 МеВ



- При β - розпаді вилітають не одна, а **дві частинки** (на відміну від α -розпаду). Тому важлива не лише загальна енергія, але й розподіл енергії розпаду між вилітаючими частинками. Енергією віддачі атомів можна знехтувати.
- В силу статистичного характеру явища, відношення енергій електрона і нейтрино може бути будь-яким. Тобто, кінетична енергія електрона може бути **від нуля до максимуму** (повна енергія розпаду).
- Періоди напіврозпаду змінюються від **10^{-3} с до 10^{16} років**
- Цей розподіл називають спектром електронів, або **β -спектром**.

β-спектр

- Спектр електронів із розпаду нейтрона. Такі спектри доволі типові.
- Ці спектри плавні (неперервні) і є завжди максимум, де спектри обриваються.



Як звідси оцінити різницю мас протона і нейтрона?

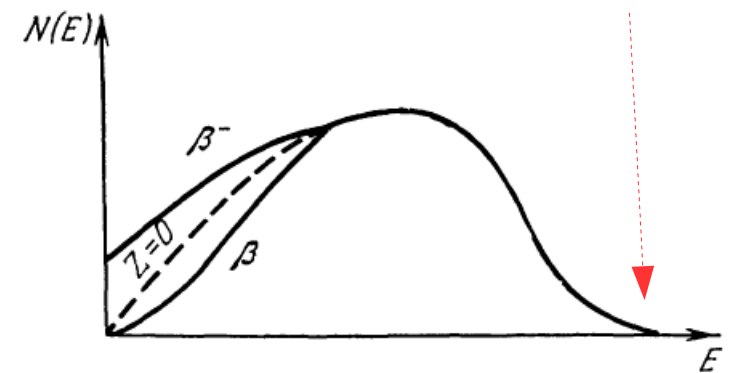
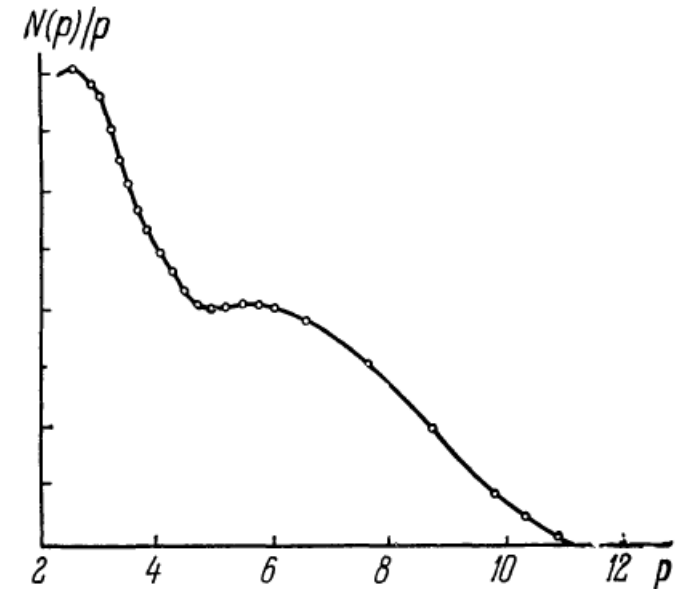
Історично, саме на основі спостереження таких спектрів Паулі в 1930 році зробив передбачення існування нейтрино. Нейтрино біли відкриті експериментально через 25 років після цього.

β-спектр

- Нерідко трапляються більш складні по формі спектри. Наприклад, для марганцю-56 розподіл електронів по імпульсам.

При ненульовій масі спокою нейтрино, верхня межа спектрів повинна бути зміщена вліво на величину цієї маси. Експериментальні вимірювання показують, що маса нейтрино повинна бути менша 3 еВ.

- В низько-енергетичній частині спектри можуть спотворюватись кулонівським полем ядра. Ця дія буде різною для позитронів і електронів.



Дозволені і заборонені β - розпади

- β - розпади розділяють на **дозволені і заборонені**. Вони відрізняються ймовірностями переходів.
- Дозволеними називають переходи, для яких сумарний орбітальний момент l , який виноситься електроном і нейтрино, дорівнює нулю.
- Заборонені переходи розрізняються порядком заборони, який визначається орбітальним моментом l .

$l = 1$ — Заборонений перехід 1-го порядку

$l = 2$ — Заборонений перехід 2-го порядку і т.д.

- Співвідношення ймовірностей з різними орбітальними моментами

$$w_l / w_0 \approx (R / \lambda)^{2l} \quad l = 0 (w_0) \text{ и } l \neq 0 (w_l)$$

R — радіус ядра

Класифікація β - розпадів і їх ймовірності

- β - розпади також діляться на переходи
 - типу Фермі — спіни вилітаючих лептонів антипаралельні,
 - типу Гамова-Теллера спіни вилітаючих лептонів паралельні,
- Ймовірності β - розпадів одержують інтегруванням β -спектра по енергії.

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \approx \int_0^{Q_\beta} T_e^2 (Q_\beta - T_e)^2 dT_e \approx Q_\beta^5$$

тут T_e - кінетична енергія електрона

Q_β - енергія β - розпаду

- Така залежність ймовірності β - розпадів від енергії характерна для всіх слабих розпадів і носить назву **правила Сарджента**.
-

β- розпади

- Залежність енергії зв'язку ядер від Z має вигляд параболи, в вершині котрої розташовані стабільні ізотопи для даного значення A .

