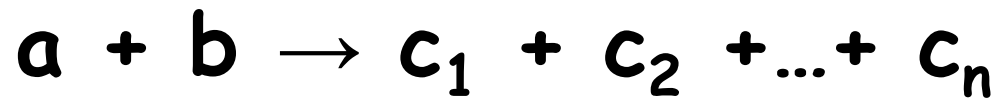


Реакции и превръщания в микросвета

Реакции между частици



- закон за запазване на (четириквектора на) енергията-импулса:

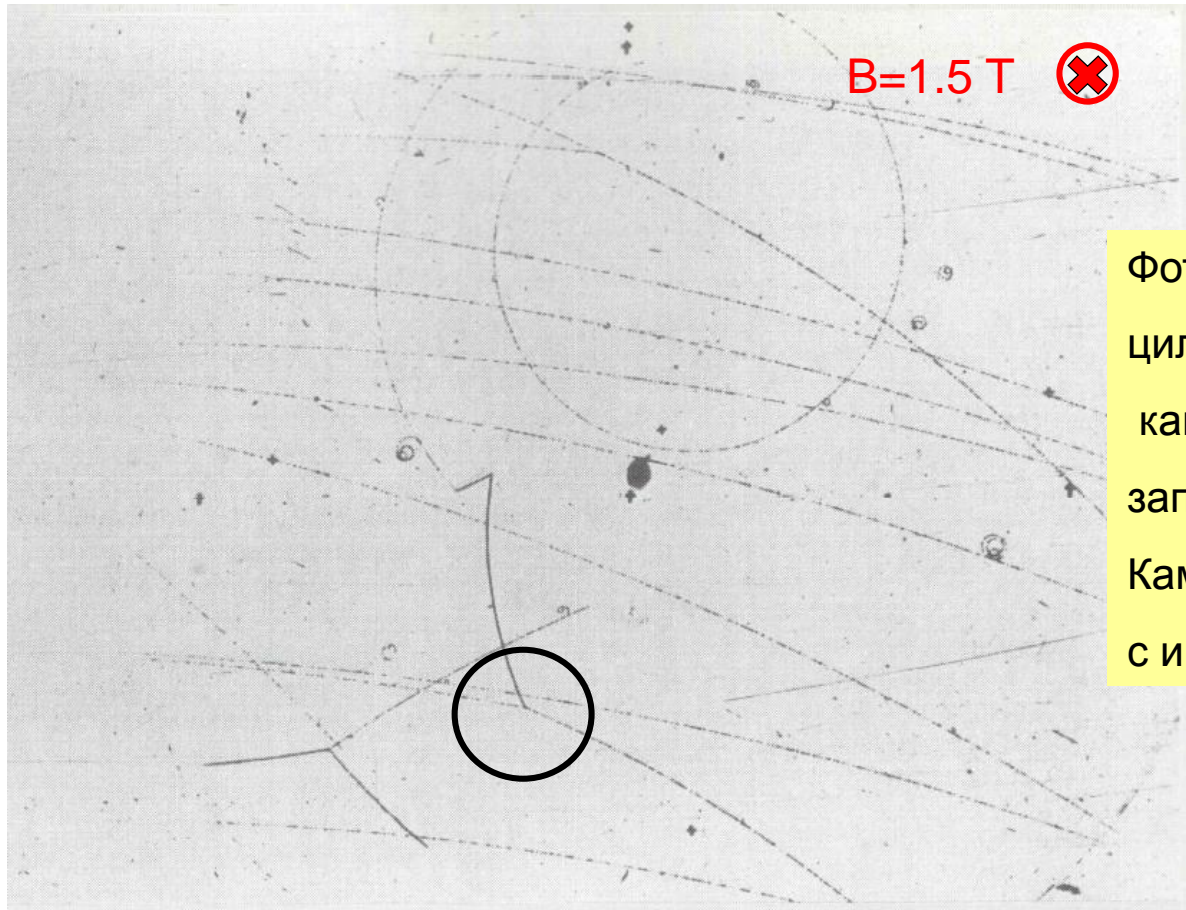
$$\tilde{p}_a + \tilde{p}_b = \sum_{i=1}^n \tilde{p}_{c_i}$$

- енергетичен праг на реакцията \rightarrow пресмятане (релативистки и нерелативистки случай)
- енергиен баланс при ядрени реакции:

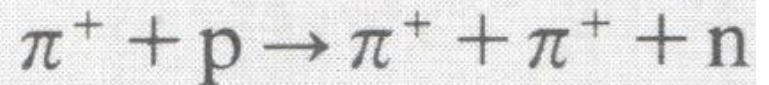
$$m(x) c^2 + m(X) c^2 + T(x) = m(Y) c^2 + m(y) c^2 + T(Y) + T(y)$$

$$Q = [m(x) + m(X) - m(Y) - m(y)] c^2$$

Примери



Фотография на взаимодействие в
цилиндрична мехурчеста
камера ($d=32\text{ cm}$),
запълнена с течен водород.
Камерата се облъчва с π^+ -мезони
с импулс 320 MeV/c



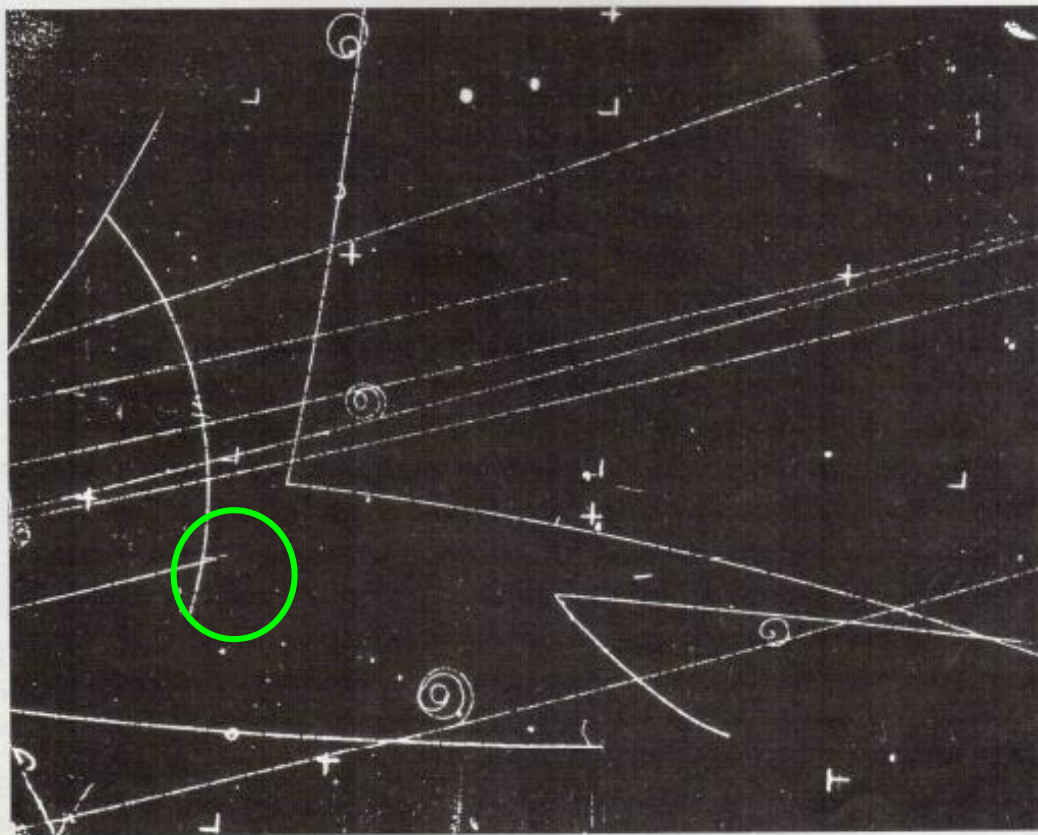


Fig. 10.8 A photograph of an interaction of a $1\text{ GeV}/c$ π^- meson with a proton in a liquid hydrogen bubble chamber. The reaction is

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda,$$

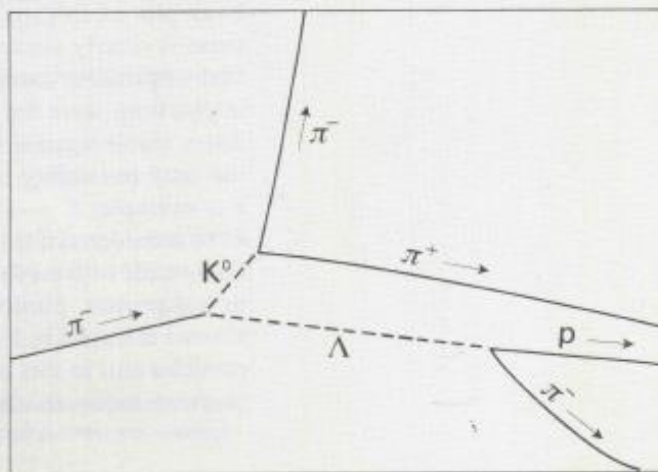
followed by

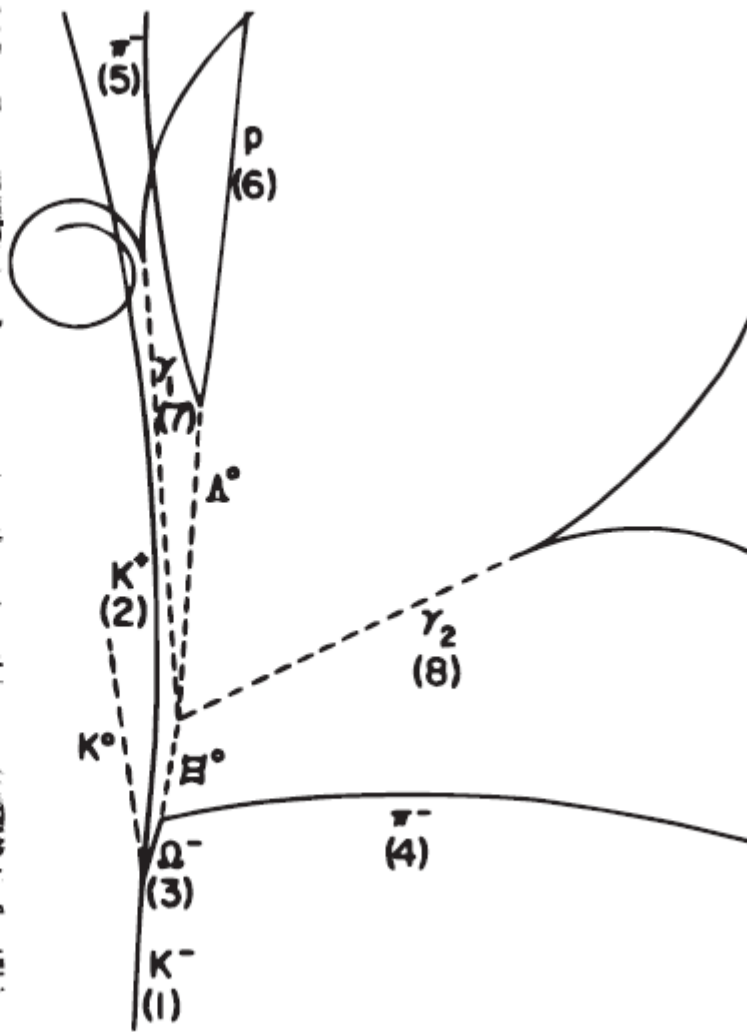
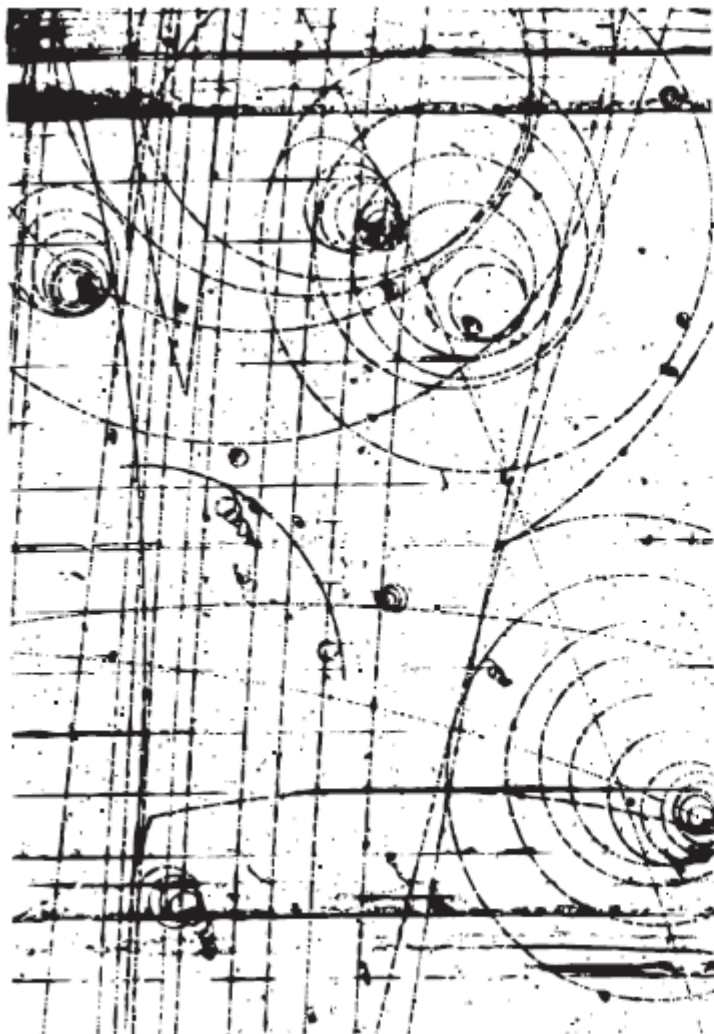
$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-,$$

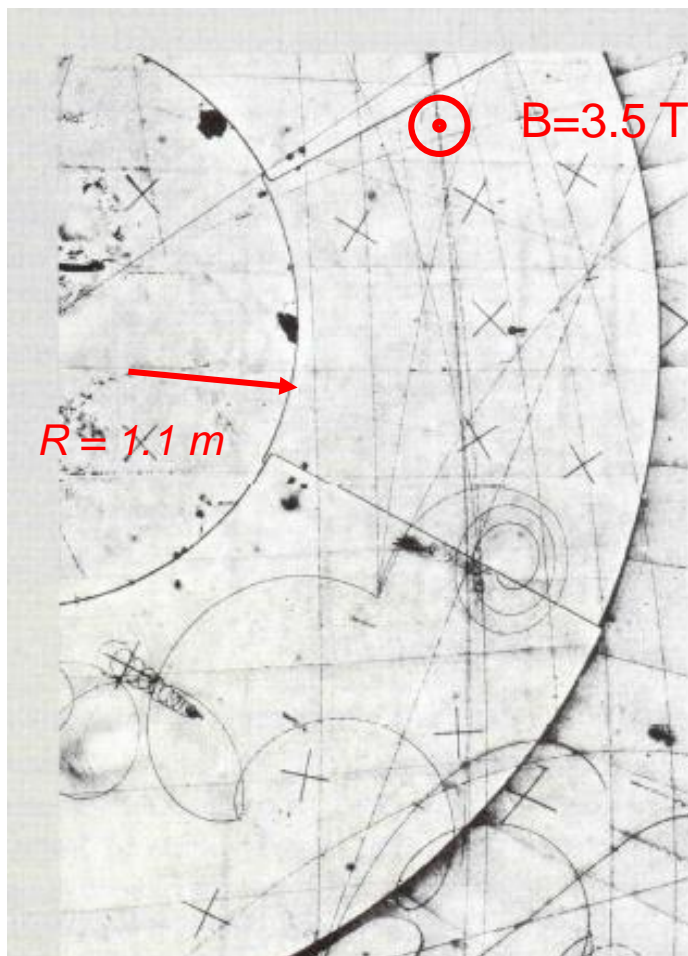
and

$$\Lambda \rightarrow \pi^- + p.$$

This is an example of associated production of two strange particles.







AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION
 WA 21
 EVENT 294/0995
 $\nu p \rightarrow D^* p \mu^-$
 μ^- 42.5
 π^+ 3.6



Фотография на неутринно взаимодействие в BEBC (Big European Bubble Chamber) в CERN запълнена с течен водород.

Камерата се облъчва с ν_μ със средна енергия ~ 30 GeV.

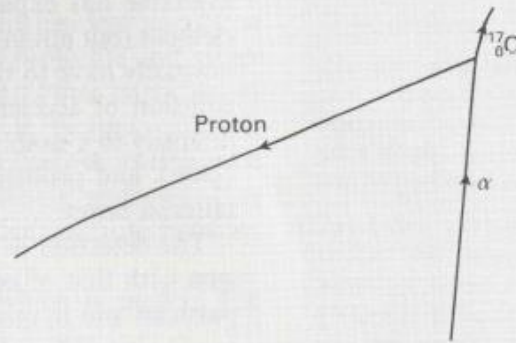
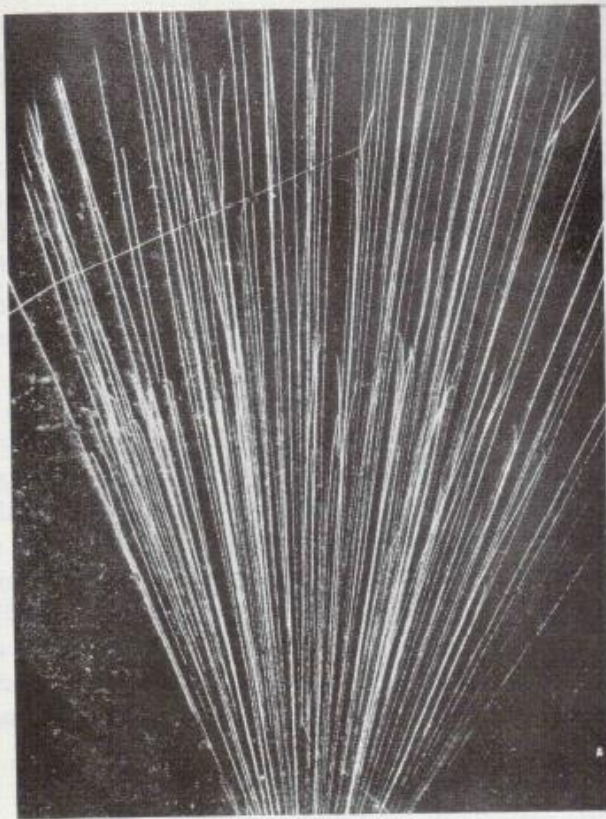
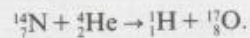


Fig. 7.1 An example of one of the cloud chamber photographs of the first nuclear reactions observed by a visual technique (Blackett and Lees, 1932). The gas in the chamber is exposed to α -particles from a source of $^{212}_{83}\text{Pb}$ (ThB in the early notation). The daughter $^{212}_{83}\text{Bi}$ (ThC) gives α -particles of 6.09 MeV. The alternative β -decay mode of ThC gives $^{212}_{84}\text{Po}$ which in turn gives α -particles of 8.78 MeV. The two groups can be separated by their different range. One longer-range α -particle has caused a nuclear reaction interpreted to be



The α -particle energy just before the collision was about 3.6 MeV. The proton is emitted at 112° with the respect to the

incident α -particle and with a kinetic energy of 1.1 MeV. The recoil $^{17}_8\text{O}$ is projected at 15° with an energy of about 1.1 MeV. Blackett and Lees determined these energies from the range (see Section 11.2) of these particles and deduced that the Q -value for this event was -1.41 ± 0.23 MeV. The modern value is -1.19 MeV.

Превръщания в микросвета (разпадане)

- Почти всички квантови системи (обекти, частици) се разпадат, т.е преминават в по-ниско енергетично състояние, докато достигнат възможния минимум;
 - *минимумът се определя от законите за запазване*
- Стабилни състояния (с минимална енергия)
 - за елементарните частици в свободно състояние: *неутрина, e^-/e^+ , фотон, протон (u- и d-кварки)*
 - за атомните ядра: *конфигурации от p и n с възможно най-ниска енергия на свързване*

Закон за (радиоактивното) разпадане

Нестабилните системи (частици) се разпадат **стохастически** – може да се предсказва поведението на ансамбъл от частици, но е **невъзможно** да се каже точно кога **дадена частица** ще се разпадне!

Ако в момента t имаме N частици и нямаме външен приток, то:

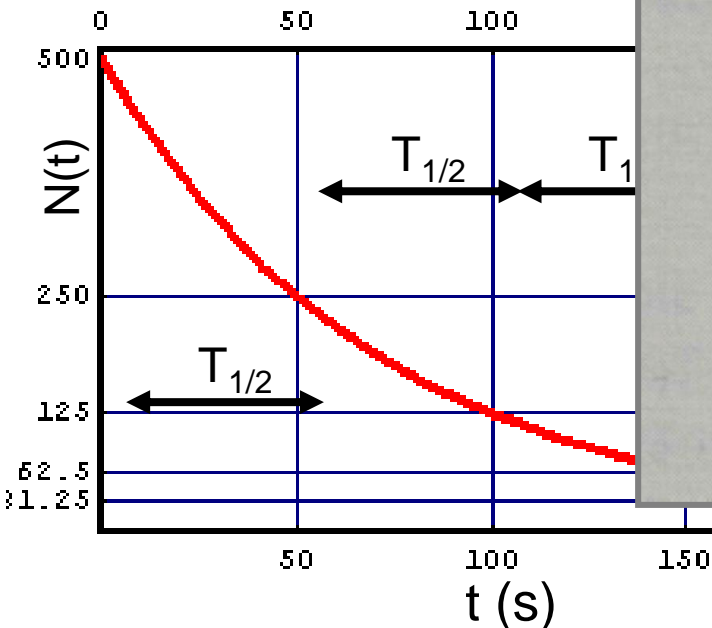
$$\lambda = - \frac{(dN / dt)}{N}$$

Вероятността за разпадане за единица време на една частица е константа, която не зависи от възрастта на частицата!

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

$$\frac{1}{2} = \frac{N(T_{1/2})}{N_0} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$



Decay	Mean life
${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + \alpha$	6.5×10^9 years
${}^{215}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{211}_{82}\text{Pb} + \alpha$	1.9×10^3 s
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	2.2×10^{-6} s
$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$	2.6×10^{-10} s
$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	8.3×10^{-17} s
$\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+$	6×10^{-24} s

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \lambda \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt = 1 / \lambda$$

АКТИВНОСТ

$$(0, N_0) \quad (t, N(t)) \quad (t + \Delta t, N(t + \Delta t))$$

$$\Delta N = N(t) - N(t + \Delta t)$$

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

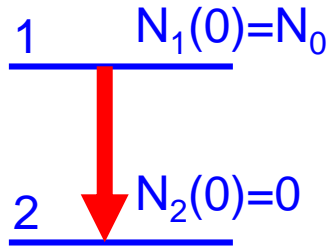
$$\Delta t \ll \lambda^{-1} (\Delta t \ll T_{1/2}) \quad e^{-\lambda \Delta t} \approx 1 - \lambda \Delta t \quad \Delta N = N_0 e^{-\lambda t} (\lambda \Delta t)$$

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A(t) \equiv \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$A [\text{разпади} / \text{s}] \quad 1 \text{ Bq} = [1 / \text{s}] \quad 1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ разпада} / \text{s}$$

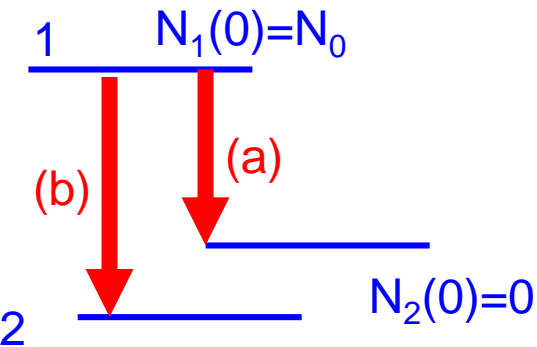
Парциални величини



$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_t t}$$

$$N_1 + N_2 = N_0$$

$$N_2 = N_0 (1 - e^{-\lambda_t t})$$



$$\lambda_b = \frac{-(dN / dt)_b}{N}$$

$$\lambda_a = \frac{-(dN / dt)_a}{N}$$

$$-\left(\frac{dN}{dt}\right) = -\left(\frac{dN}{dt}\right)_a - \left(\frac{dN}{dt}\right)_b = N(\lambda_a + \lambda_b) = N\lambda_t$$

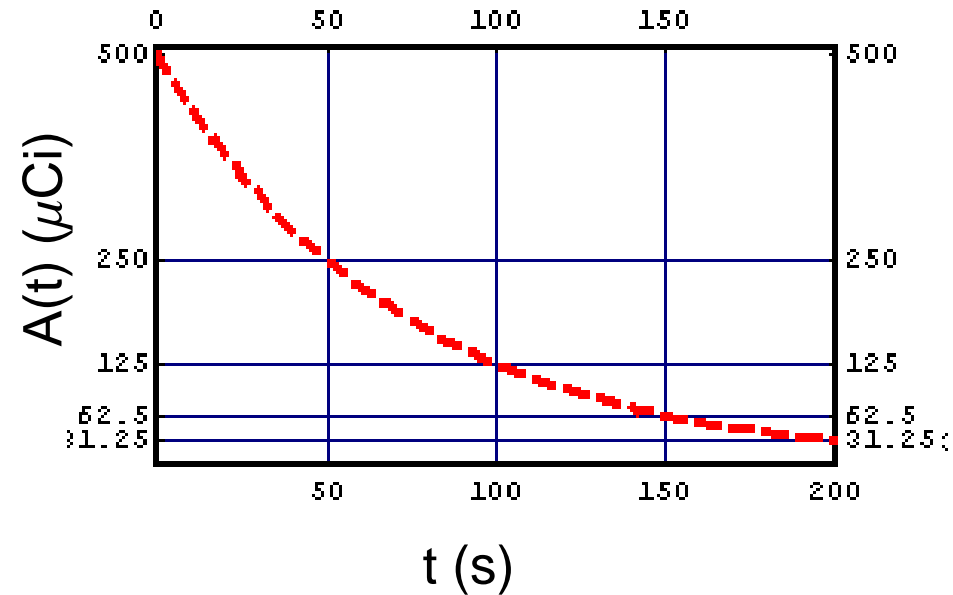
$$\lambda_t = \lambda_a + \lambda_b$$

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_t t} \quad N_{2,a} = \frac{\lambda_a}{\lambda_t} N_0 (1 - e^{-\lambda_t t}) \quad N_{2,b} = \frac{\lambda_b}{\lambda_t} N_0 (1 - e^{-\lambda_t t})$$

$$A_a(t) = \lambda_a N(t) = \lambda_a N_0 e^{-\lambda_t t} = \frac{\lambda_a}{\lambda_t} A_0 e^{-\lambda_t t} \quad A_b(t) = \frac{\lambda_b}{\lambda_t} A_0 e^{-\lambda_t t}$$

$$\frac{A_a}{A_b} = \frac{\lambda_a}{\lambda_b} \approx \frac{I_a}{I_b}$$

Измерване на времена на ЖИВОТ



секунди $< T_{1/2} <$ няколко години:
измерване на зависимостта на
активността от времето.

$T_{1/2} >$ няколко години: измерване на активността

$$\lambda = - \frac{(dN / dt)}{N}$$

$10^{-9} \text{ s} < T_{1/2} <$ части от секундата \rightarrow задържани съвпадения (измерване на зависимостта на активността от времето).

$10^{-20} \text{ s} < T_{1/2} < 10^{-9} \text{ s} \rightarrow$ Лоренцово удължаване на t (измерване на зависимостта на активността от времето \rightarrow прелетното разстояние).

Енергетична ширина на разпадащите се състояния

В полукласическо приближение задачата за разпад може да се третира пертурбативно – разпадането се дължи на малка добавка V' в потенциала $(V+V')$, като V определя стационарните решения.

$$(\hat{T} + \hat{V}) \psi_a = E_a \psi_a \quad a \xrightarrow{V'} b$$

$$\Psi_a(\vec{r}, t) = \psi_a(\vec{r}) e^{-i E_a t / \hbar} \quad |\Psi_a(t)|^2 = |\Psi_a(t=0)|^2 e^{-t/\tau}$$

$$\Psi_a(\vec{r}, t) = \psi_a(\vec{r}) e^{-i E_a t / \hbar} e^{-t/2\tau} \quad \leftarrow \text{не е собствена функция, т.е. няма определена енергия}$$

$$\Psi_a(t) = \int_0^\infty A(E) e^{-i Et / \hbar} dE$$

$$\begin{aligned} A(E) &= \int_0^\infty \Psi_a(t) e^{i Et / \hbar} dt = \int_0^\infty e^{-i E_a t / \hbar} e^{-t/2\tau} e^{i Et / \hbar} dt = \int_0^\infty e^{[-i(E_a - E) - \Gamma_a/2] t / \hbar} dt = \\ &= \left(\frac{\hbar e^{[-i(E_a - E) - \Gamma_a/2] t / \hbar}}{-i(E_a - E) - \Gamma_a/2} \right)_0^\infty = \frac{\hbar}{-i(E - E_a) + \Gamma_a/2} \end{aligned} \quad \Gamma_a = \hbar / \tau_a$$

$$P(E) dE = |A(E)|^2 dE$$

$$= \frac{\hbar^2 dE}{(E - E_a)^2 + \Gamma_a^2 / 4}$$

$$\Gamma_a = \hbar / \tau_a$$

естествена ширина на състоянието ψ_a

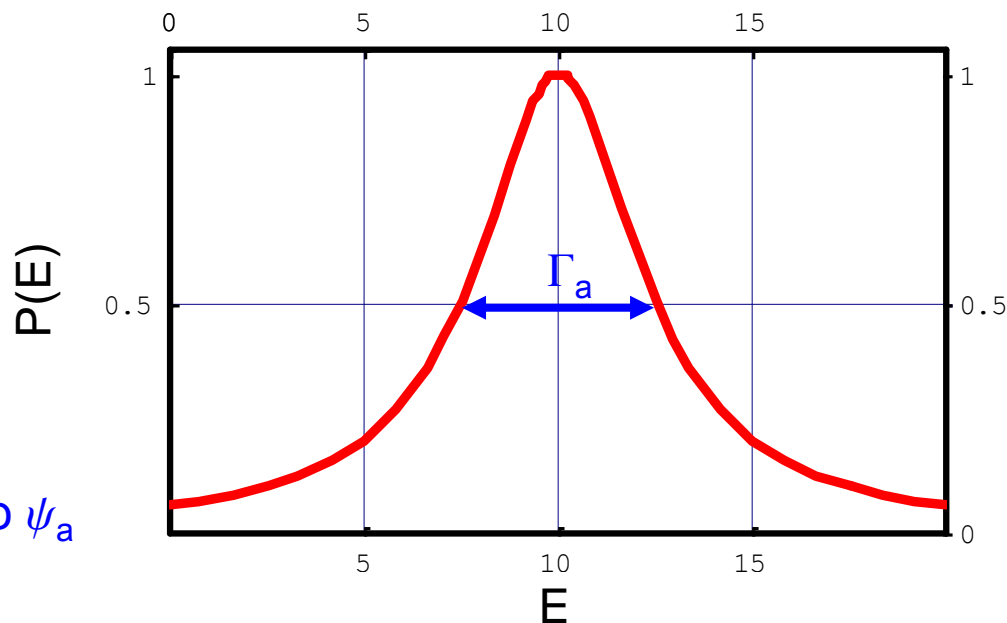
$$\Delta E \Delta \tau \geq \hbar / 2$$

$$\hbar = 6.58 \times 10^{-22} \text{ MeV s}$$

γ -преходи в ядрата

$$\tau \sim 1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$$

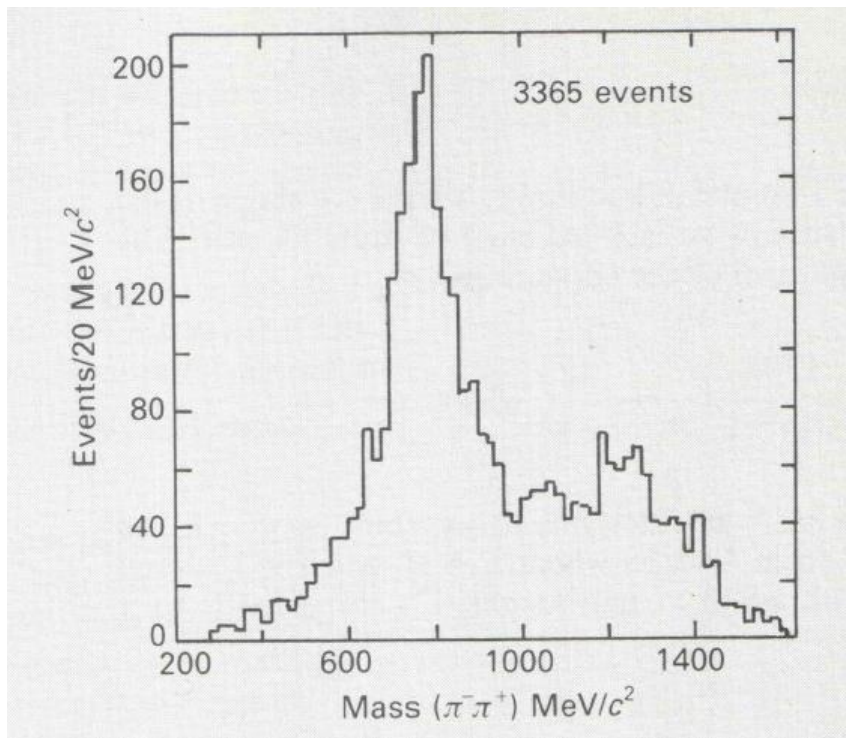
$$\Gamma \sim 10^{-10} \text{ MeV}$$



разпад	време на живот τ , s	енергетична ширина Γ , MeV
	2.2×10^{-6}	$3 \times 10^{-16} \mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	2.6×10^{-8}	2.5×10^{-14}
$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	0.87×10^{-16}	7.7×10^{-6}
$\rho \rightarrow \pi\pi$	4.36×10^{-24}	153
$\Lambda \rightarrow p\pi^-$ $\rightarrow n\pi^0$	2.6×10^{-10}	2.5×10^{-12}

Пряко измерване на Γ

- метод на инвариантната (ефективната) маса
 - за елементарни частици, разпадащи се поради силно взаимодействие



$$m_\rho \approx 770 \text{ MeV}/c^2$$

$$\Gamma_\rho \approx 150 \text{ MeV}$$

- ефект на Мьосбауер
 - за (много малко) ядрени възбудени състояния

Означения в ядрената физика

1932 - Chadwick – открива нейтрона – **електрически неутрална частица** с маса $m_n \approx m_p$ ($m_p = 938.272 \text{ MeV}$, $m_n = 939.566 \text{ MeV}$, $\Delta m = 1.293 \text{ MeV}$)

{**протон**, **неутрон**} \equiv **нуклеон**

ЯДРО $\equiv Z, N, A=N+Z$

$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X_N$

$X \equiv Z$

$\begin{matrix} A \\ X \end{matrix} N$

$A = N + Z$

$\begin{matrix} A \\ X \end{matrix}$

$\begin{matrix} 238 \\ 92 \end{matrix} U_{146}$

$U \equiv 92$

$\begin{matrix} 238 \\ U \end{matrix}_{146}$

$238 = 146 + 92$

$\begin{matrix} 238 \\ U \end{matrix}$

Z – константа – **изотопи** (^{112}Sn , ^{114}Sn , ^{115}Sn , ^{116}Sn , ^{118}Sn , ^{120}Sn) $Z=50$

N – константа – **изотони** (^{132}Te , ^{134}Xe , ^{136}Ba , ^{138}Ce) $N=80$

Радиоактивност

- α разпад - ${}^A_ZX_N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + {}^4_2\text{He}_2 : E_\alpha \approx 5 \text{ MeV}$,
- β разпад - ${}^A_ZX_N \rightarrow {}^A_{Z+1}Y_{N-1} + e^- + \bar{\nu}_e$ β - минус
 ${}^A_ZX_N \rightarrow {}^A_{Z-1}Y_{N+1} + e^+ + \nu_e$ β - плюс
 ${}^A_ZX_N + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1}Y_{N+1} + \nu_e$ $E\beta \quad E_\beta \leq 1 \text{ MeV}$
- γ разпад/преход - електромагнитно лъчение $E_\gamma \approx 0.05 \div 20 \text{ MeV}$
- спонтанно делене - ${}^AX \rightarrow {}^{A1}Y + {}^{A2}Z + Nn, A > 230$
- редки разпади - с излъчване на един или два протона (${}^{113}\text{Cs} \rightarrow {}^{112}\text{Xe} + p$),
неутрон (${}^{13}\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{Be} + n$), ядрени клъстери ${}^8\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ (${}^{114}\text{Ba} \rightarrow {}^{102}\text{Sn} + {}^{12}\text{C}$);

Произход

Естествена радиоактивност:

1) Радиоактивни изотопи, оцелели от момента на формиране на планетата ($4.6 \times 10^9 \text{ y}$):

18 със $Z < 80$

${}^{40}\text{K}$ ($1.28 \times 10^8 \text{ y}$)

45 със $Z > 80$

${}^{238}\text{U}$ ($4.46 \times 10^9 \text{ y}$), ${}^{232}\text{Th}$ ($1.41 \times 10^{10} \text{ y}$), ${}^{235}\text{U}$ ($7.03 \times 10^8 \text{ y}$)

2) Радиоактивни изотопи, които се произвеждат непрекъснато: ${}^{14}\text{N} + n \rightarrow {}^{14}\text{C} + p$

Изкуствена радиоактивност:

${}^4\text{He} + {}^{27}\text{Al} \rightarrow {}^{30}\text{P} + p$ (Joliot-Curie, Нобелова награда за химия 1935)



Добив/Разпад

$N_1(t)$ ^{120}Xe $\xrightarrow{\beta^+}$ ^{120}I $N_2(t)$
 $T_{1/2} = 40 \text{ m}$

$$\frac{dN_1}{dt} = Y - \lambda_1 N_1$$

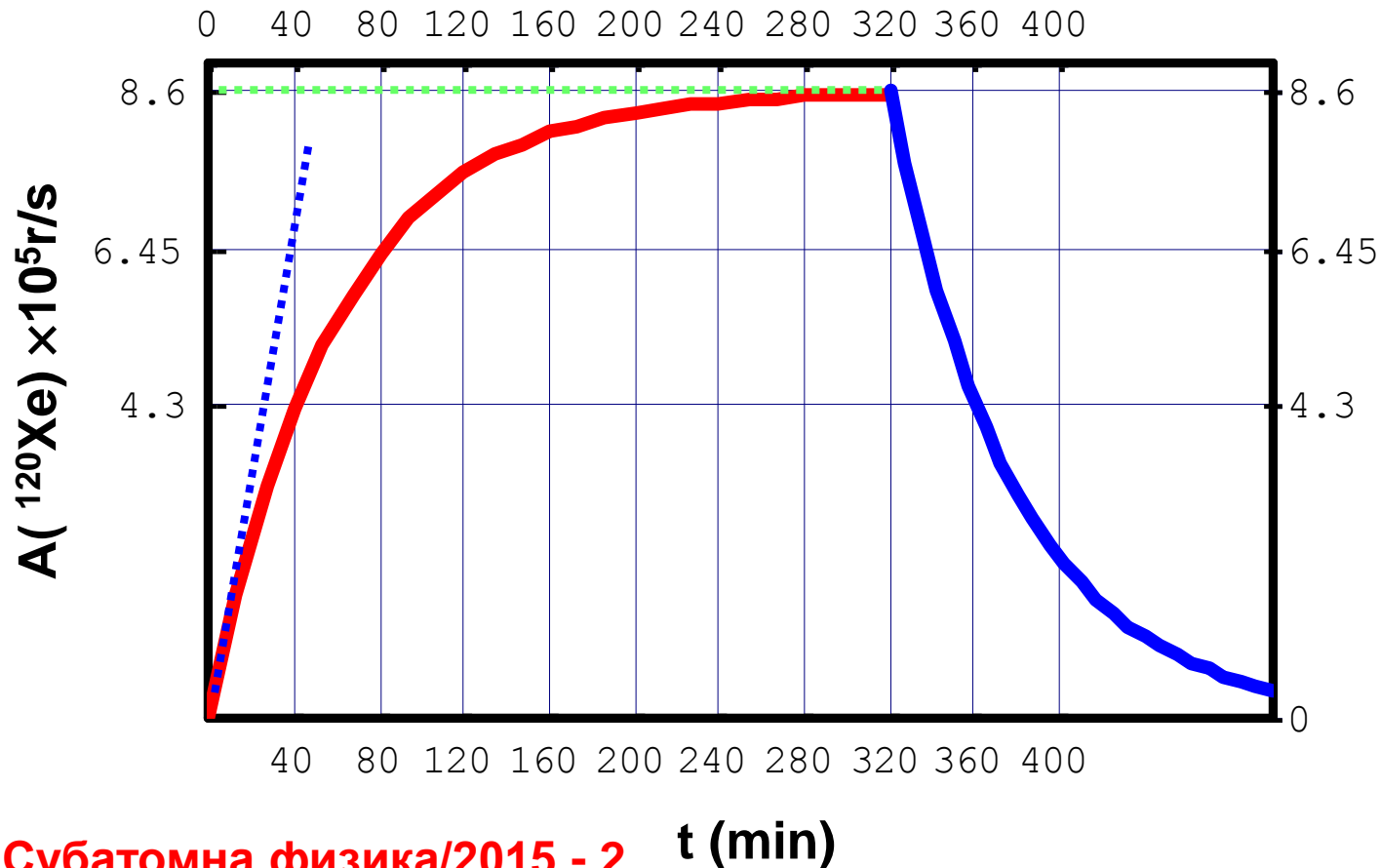
$$\lambda_1 = \frac{\ln 2}{t_{1/2,1}} = \frac{1}{\tau}$$

$$\lambda_1 = 0.017 \text{ min}^{-1}$$

$$\tau = 58 \text{ min}$$

$$N_1(t) = \frac{Y}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t})$$

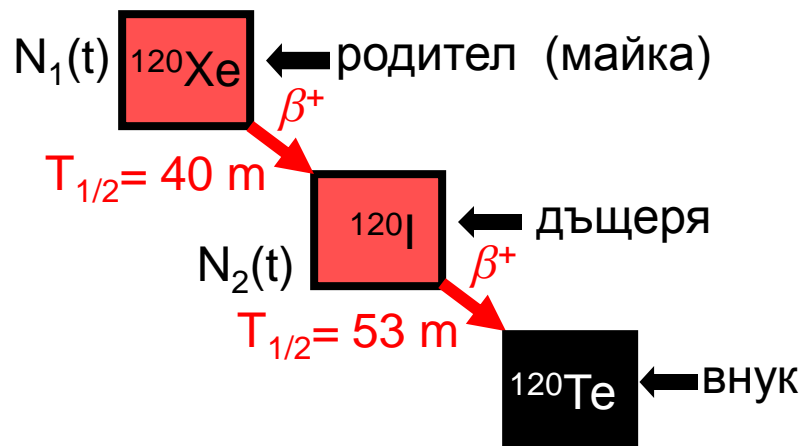
$$A_1(t) = \lambda_1 N(t) = Y (1 - e^{-\lambda_1 t})$$



$t \ll t_{1/2}$
 $A_1(t) \approx Y \lambda_1 t$

$t \gg t_{1/2}$
 $A_1(t) \approx Y$

Две последователни разпадания



$$N_1(t=0) = N_0$$

$$N_2(t=0) = 0$$

$$dN_1 = -\lambda_1 N_1 dt$$

$$dN_2 = \lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt$$

$$N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = A e^{-\lambda_1 t} + B e^{-\lambda_2 t}$$

$$N_2(0) = 0 = A + B \rightarrow A = -B$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 (N_0 e^{-\lambda_1 t}) - \lambda_2 (A e^{-\lambda_1 t} + B e^{-\lambda_2 t})$$

$$= -\lambda_1 A e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 B e^{-\lambda_2 t}$$

$$A = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_0$$

$$N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\lambda_2 = 0 (\tau \rightarrow \infty)$$

$$N_2(t) = N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t})$$

Две последователни разпадания $\lambda_1 \ll \lambda_2$

$$\lambda_1 \ll \lambda_2$$

$$\tau_1 \gg \tau_2$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \text{const}$$

$$e^{-\lambda_1 t} \approx 1$$

$$N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

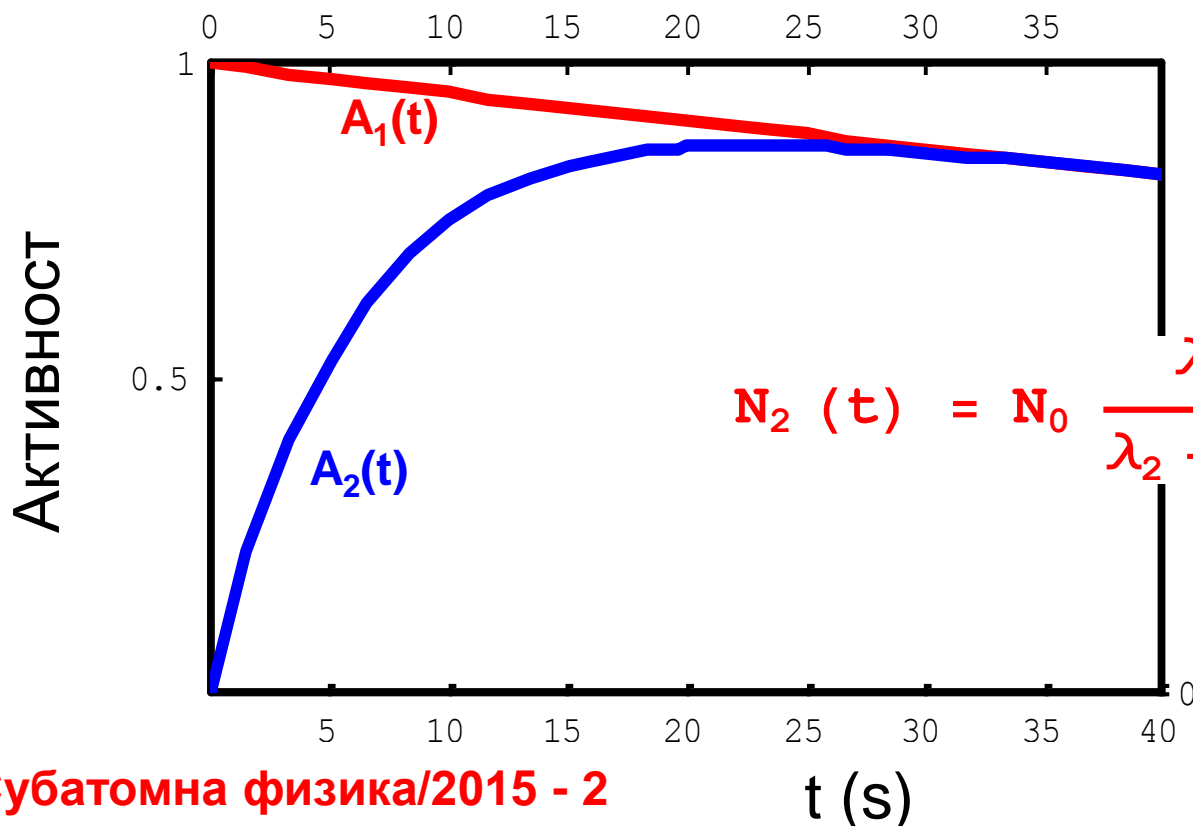
$$A_2(t) = A_1 (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

$A_2 \rightarrow A_1$
равновесие

$$^{114}\text{Pd} \xrightarrow{T_{1/2} = 2.4 \text{ m}}$$



$$T_{1/2} = 4.5 \text{ s}$$



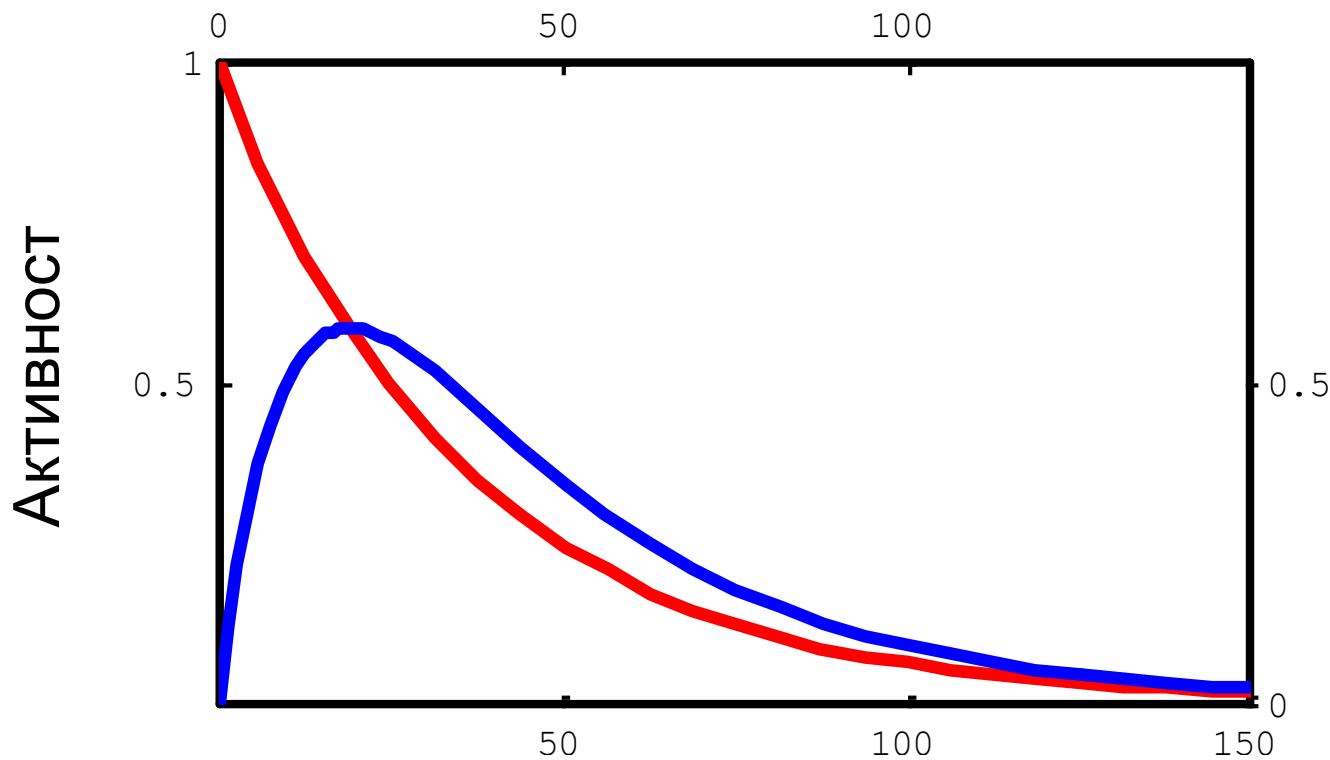
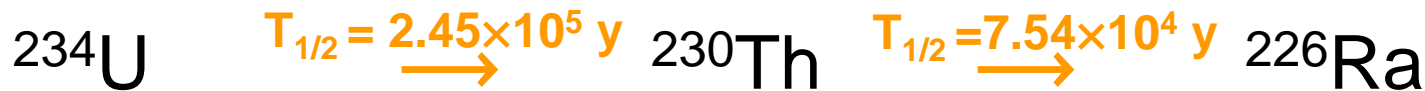
$$N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Две последователни разпадания $\lambda_1 < \lambda_2$

$$N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\frac{\lambda_2 N_2(t)}{\lambda_1 N_1(t)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t})$$

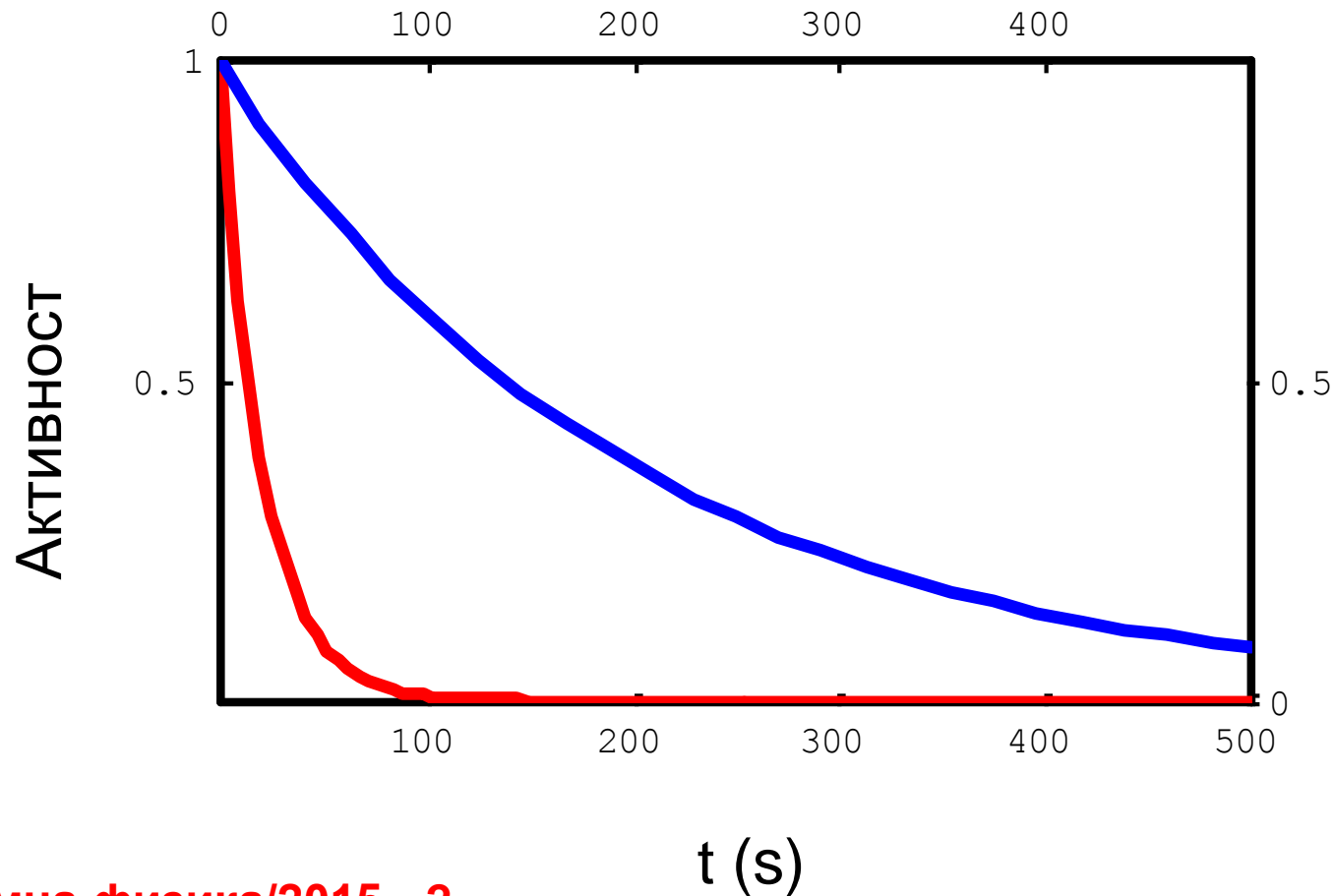


Преходно равновесие

$$t \sim 10 T_2$$

Две последователни разпадания $\lambda_1 > \lambda_2$

$$N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t}$$



Три последователни разпадания

$$dN_1 = -\lambda_1 N_1 dt$$

$$dN_2 = \lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt$$

$$dN_3 = \lambda_2 N_2 dt - \lambda_3 N_3 dt$$

$$N_1(0) = N_0$$

$$N_2(0) = N_3(0) = 0$$

$$N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_3(t) = C e^{-\lambda_1 t} + D e^{-\lambda_2 t} + E e^{-\lambda_3 t}$$

$$N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$-\lambda_1 C e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 D e^{-\lambda_2 t} - \lambda_3 E e^{-\lambda_3 t} = N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) - \lambda_3 C e^{-\lambda_1 t} - \lambda_3 D e^{-\lambda_2 t} - \lambda_3 E e^{-\lambda_3 t}$$

$$(\lambda_3 - \lambda_1) C e^{-\lambda_1 t} + (\lambda_3 - \lambda_2) D e^{-\lambda_2 t} = N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t}$$

$$(\lambda_3 - \lambda_1) C = N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$(\lambda_3 - \lambda_2) D = -N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$D + C = -E$$

$$C = N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)}$$

$$D = N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)}$$

$$E = N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

$$N_3(t) = N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t} + N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} + N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t}$$

$$A_3(t) = \lambda_3 N_3(t) =$$

$$= N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t} + N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} + N_0 \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t}$$

N последователни разпадания

$$dN_1 = -\lambda_1 N_1 dt$$

$$dN_2 = \lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt$$

$$dN_3 = \lambda_2 N_2 dt - \lambda_3 N_3 dt$$

....

$$dN_N = \lambda_{N-1} N_{N-1} dt - \lambda_N N_N dt$$

$$N_1(0) = N_0$$

$$N_2(0) = N_3(0) = \dots N_N(t) = 0$$

$$N_N(t) = \sum_{i=1}^N c_i e^{-\lambda_i t}$$

Dobromir S. Pressyanov (Faculty of Physics, St. Kliment Ohridski University of Sofia), [Short solution of the radioactive decay chain equations](#), Am. J. Phys. 70 (2002) 444-445

$$c_m = \frac{\prod_{i=1}^{N-1} \lambda_i}{\prod_{i \neq m}^N (\lambda_i - \lambda_m)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{N-1}}{(\lambda_1 - \lambda_m) (\lambda_2 - \lambda_m) \dots (\lambda_N - \lambda_m)}$$

$$A_N(t) = \lambda_N \sum_{i=1}^N c_i e^{-\lambda_i t} = \sum_{i=1}^N c'_i e^{-\lambda_i t}$$

$$c'_m = \frac{\prod_{i=1}^N \lambda_i}{\prod_{i \neq m}^N (\lambda_i - \lambda_m)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{N-1} \lambda_N}{(\lambda_1 - \lambda_m) (\lambda_2 - \lambda_m) \dots (\lambda_N - \lambda_m)}$$

Естествена радиоактивност

$4n + 1$ (Нептуниева) – $^{237}\text{Np}(2.14 \times 10^6 \text{y}) \rightarrow \dots \rightarrow ^{209}\text{Bi}$

$4n + 2$ (Уранова) – $^{238}\text{U}(4.47 \times 10^9 \text{y}) \rightarrow \dots \rightarrow ^{222}\text{Rn}(3.8 \text{d}) \rightarrow \dots \rightarrow ^{206}\text{Pb}$

$4n + 3$ (Актиниева) – $^{235}\text{U}(7.04 \times 10^8 \text{y}) \rightarrow \dots \rightarrow ^{207}\text{Pb}$

Други

^{40}K ($1.28 \times 10^9 \text{y}$)

^{87}Rb ($4.8 \times 10^{10} \text{y}$)

^{113}Cd ($9 \times 10^{15} \text{y}$)

^{115}In ($4.4 \times 10^{14} \text{y}$)

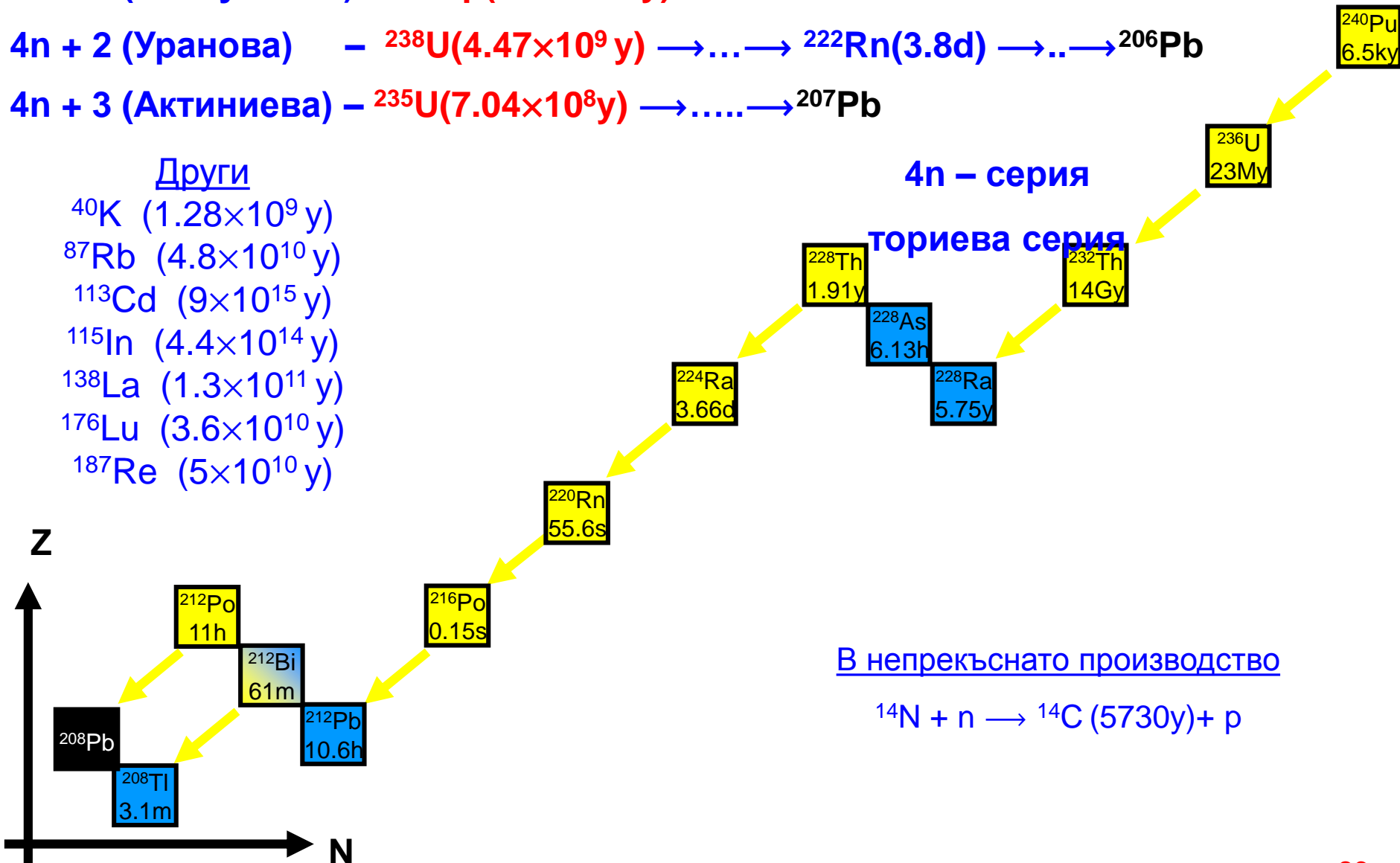
^{138}La ($1.3 \times 10^{11} \text{y}$)

^{176}Lu ($3.6 \times 10^{10} \text{y}$)

^{187}Re ($5 \times 10^{10} \text{y}$)

$4n$ – серия

ториева серия



В непрекъснато производство



Радиоактивно датиране

Проба - изградена от радиоактивен родител, атомите на родителя и дъщерните продукти не напускат пробата, в момента $t=t_0$ в има само атоми на родителя и няма външен принос!

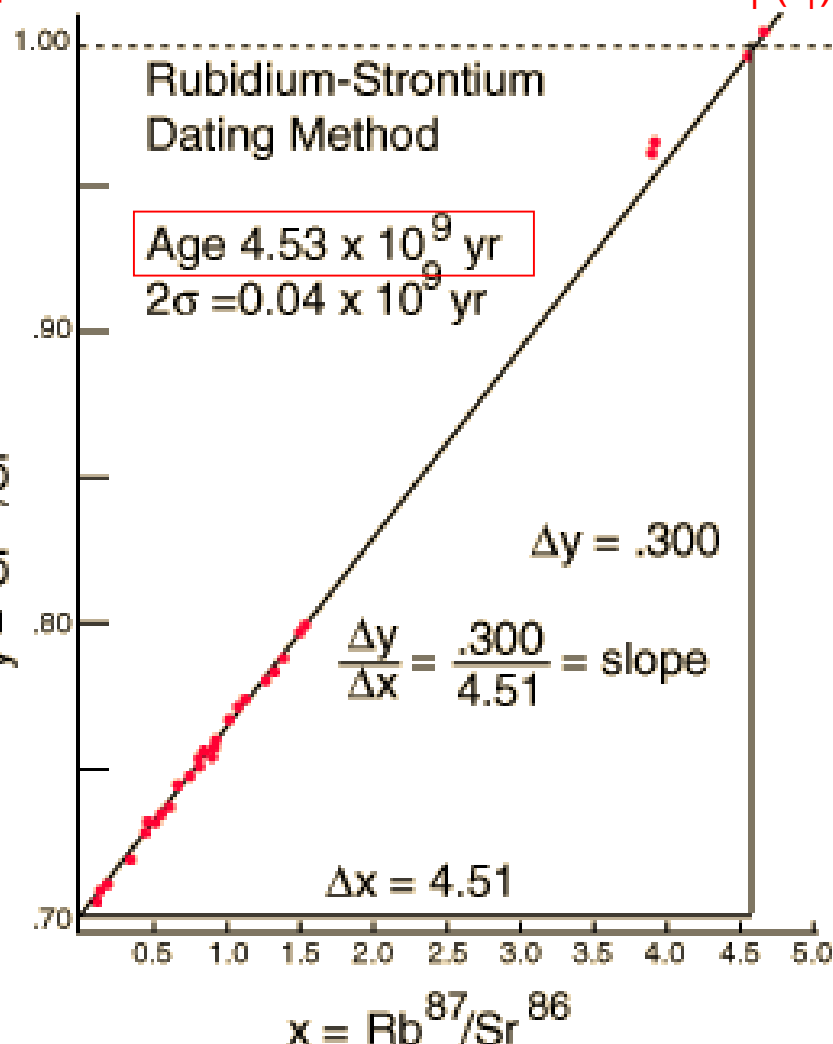
$$\begin{array}{ccc}
 t = t_0 & P \longrightarrow D & t = t_1 \\
 N_P(t_0) & \lambda & N_P(t_1) + N_D(t_1) \\
 N_P(t_0) = N_P(t_1) + N_D(t_1) & & \\
 N_P(t_1) = N_P(t_0) e^{-\lambda(t_1-t_0)} & & \\
 \Delta t \equiv t_1 - t_0 = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_P(t_0)}{N_P(t_1)} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_D(t_1)}{N_P(t_1)} \right)
 \end{array}$$

Проба - изградена от радиоактивен родител, атомите на родителя и дъщерните продукти не напускат пробата, в момента $t=t_0$ в има атоми на родителя и “дъщерята” и няма външен принос!

$$\begin{array}{ccc}
 t = t_0 & P \longrightarrow D & t = t_1 \\
 N_P(t_0) + N_D(t_0) & \lambda & N_P(t_1) + N_D(t_1) \\
 N_{D'}(t_0) = D' - \text{стабилен изотоп на } D, \text{ който не участва в разпада} & & = N_{D'}(t_1) \\
 N_P(t_0) + N_D(t_0) = N_P(t_1) + N_D(t_1) & & \\
 N_{D'}(t_0) = N_{D'}(t_1) & & \\
 \frac{N_D(t_1)}{N_{D'}(t_1)} = \frac{N_P(t_1)}{N_{D'}(t_1)} [e^{-\lambda \Delta t} - 1] + \frac{N_D(t_0)}{N_{D'}(t_0)}
 \end{array}$$

Възраст на планетата

Всички минерали, които са се образували заедно, трябва да имат една и съща възраст и еднакво изотопно отношение $N_D(t_0)/N_{D'}(t_0)$ въпреки че за всеки от тях $N_P(t_0)$ може да е различно \longrightarrow $N_P(t_1)/N_{D'}(t_1)$ и $N_D(t_1)/N_{D'}(t_1)$ ще са различни, но:



$$\begin{array}{c} y \\ \downarrow \\ \frac{N_D(t_1)}{N_{D'}(t_1)} \end{array} = \begin{array}{c} x \\ \downarrow \\ \frac{N_P(t_1)}{N_{D'}(t_1)} \end{array} \begin{array}{c} a = \text{const} \\ \downarrow \\ [e^{-\lambda \Delta t} - 1] \end{array} + \begin{array}{c} b = \text{const} \\ \downarrow \\ \frac{N_D(t_0)}{N_{D'}(t_0)} \end{array}$$

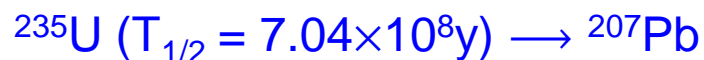
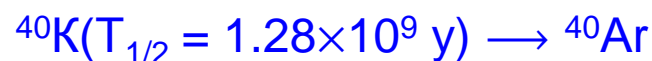
$$y = ax + b$$



^{86}Sr – стабилен

$$y = ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \quad x = ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$$

Други двойки изотопи



Въглероден метод за датиране на органични проби



константен добив



Равновесие: $\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} \approx 1.3 \times 10^{-12}$

1 атом ^{14}C на 10^{12} атома ^{12}C

1g (C) $\Leftrightarrow 6.0 \times 10^{23}$ атома

$\Leftrightarrow 6 \times 10^{12}$ ^{14}C
специфична активност

$A(^{14}\text{C/g}) \approx 23$ разпада/min

Проблеми

- трудно приложим за времена по-дълги от $10T_{1/2}$ (сепаратори до 10^5 y);
- неприложим за проби от последните 100 години поради интензивното използване на органични горива и ядрените опити в атмосферата

