

Fizyka promieniowania jonizującego

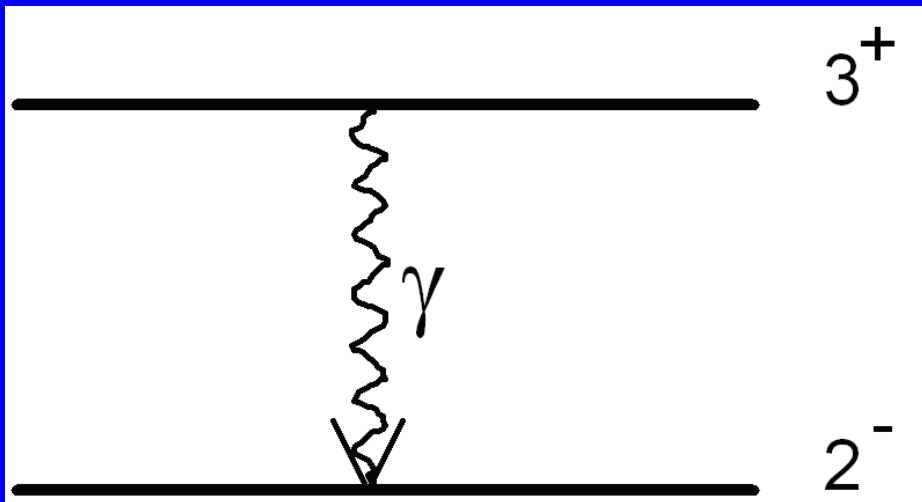
Zygmunt Szefliński

Wykład 11

Rozpady cd.

Przejścia elektromagnetyczne

Typ promieniowania	E1 dipolowe elektryczne	E2 kwadrupolowe elektryczne	E3 Oktupolowe elektryczne	M1 dipolowe Magnetyczne	M2 kwadrupolowe Magnetyczne
"polowość"	1	2	3	1	2
zmiana parzystości	tak	nie	tak	nie	tak



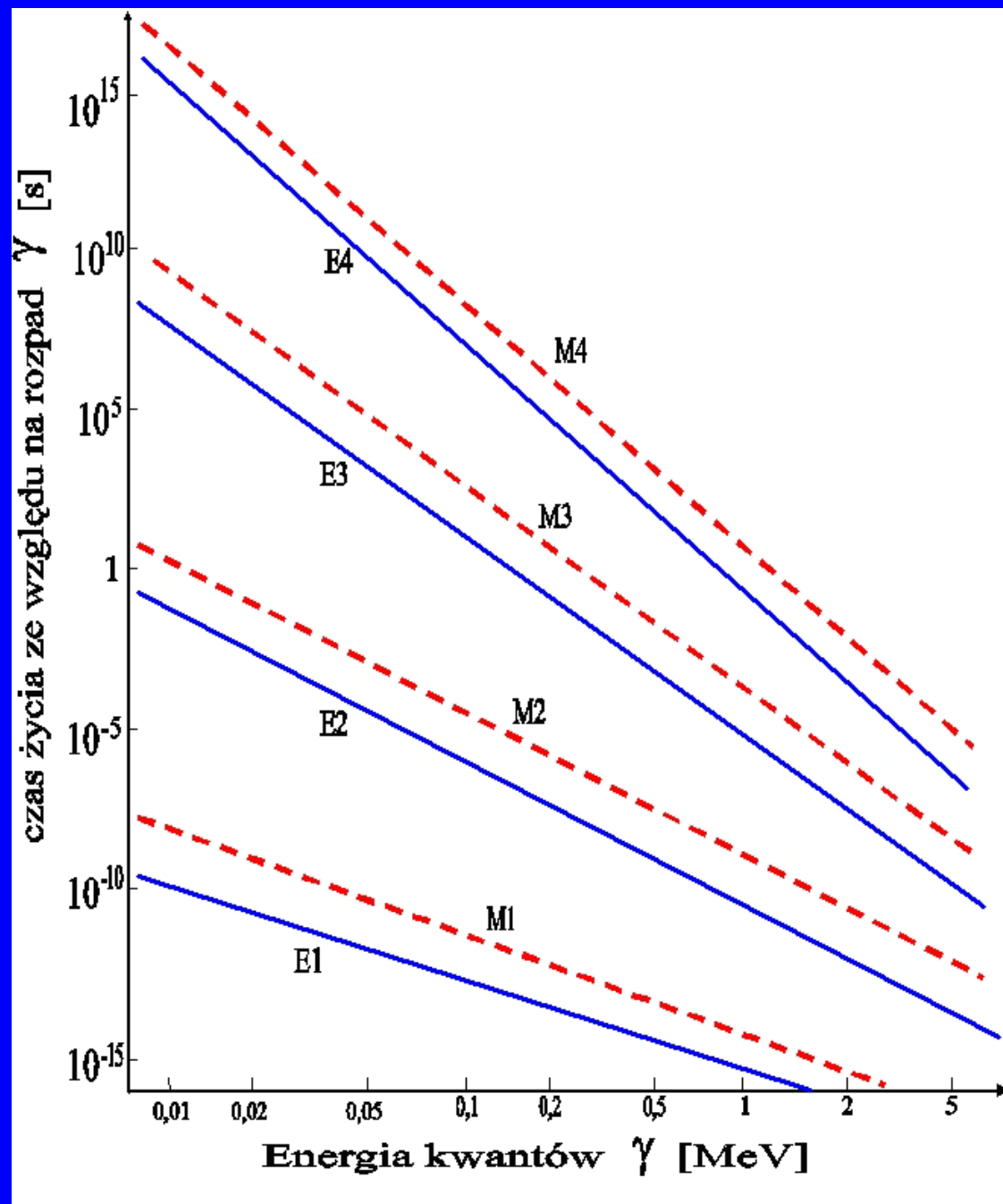
$$\frac{P_{pocz}}{P_{konc}} = (-1)^L$$

dla promieniowania
typu EL

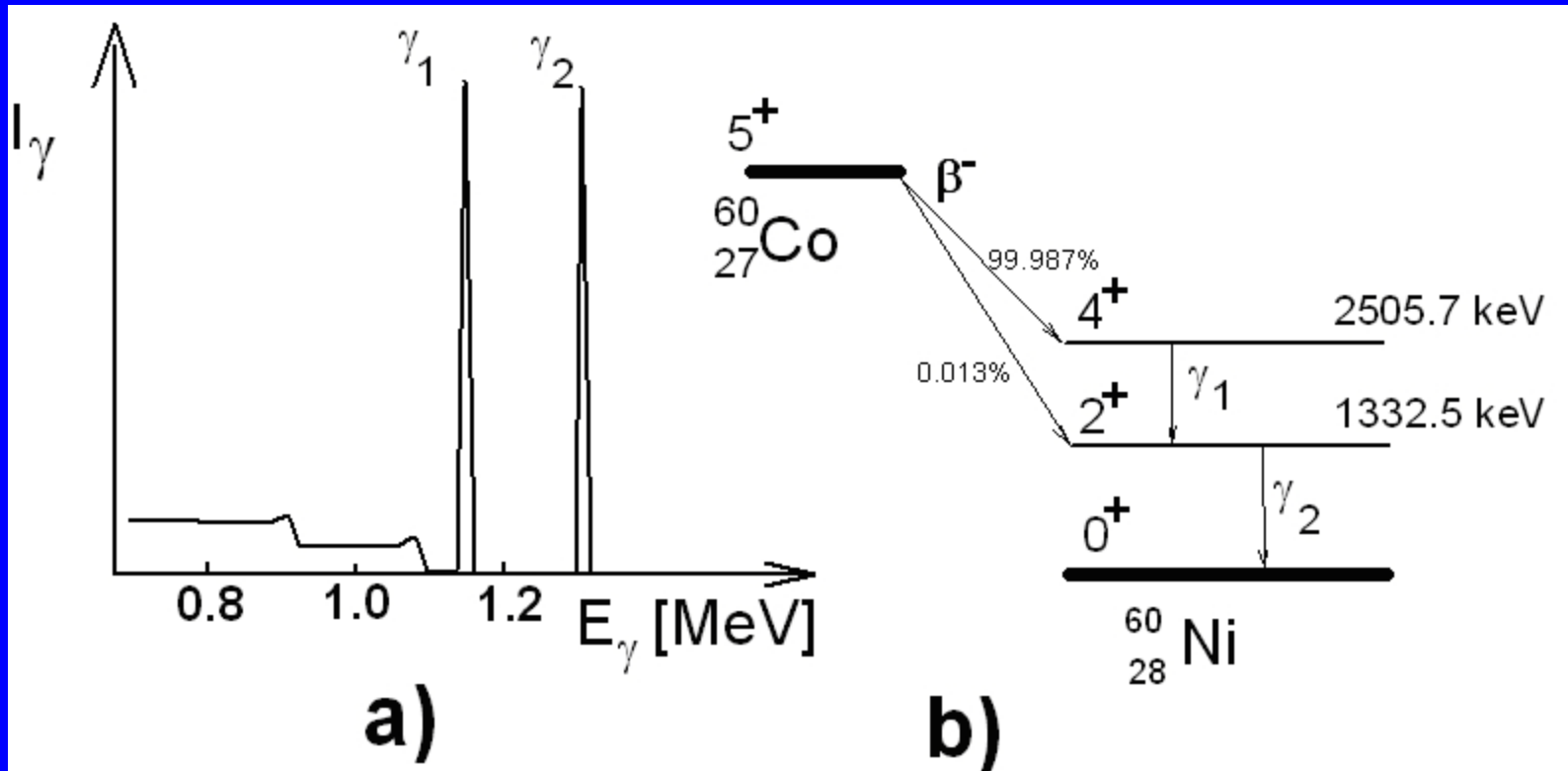
$$\frac{P_{pocz}}{P_{konc}} = (-1)^{L+1}$$

dla promieniowania
typu ML

Czasy życia

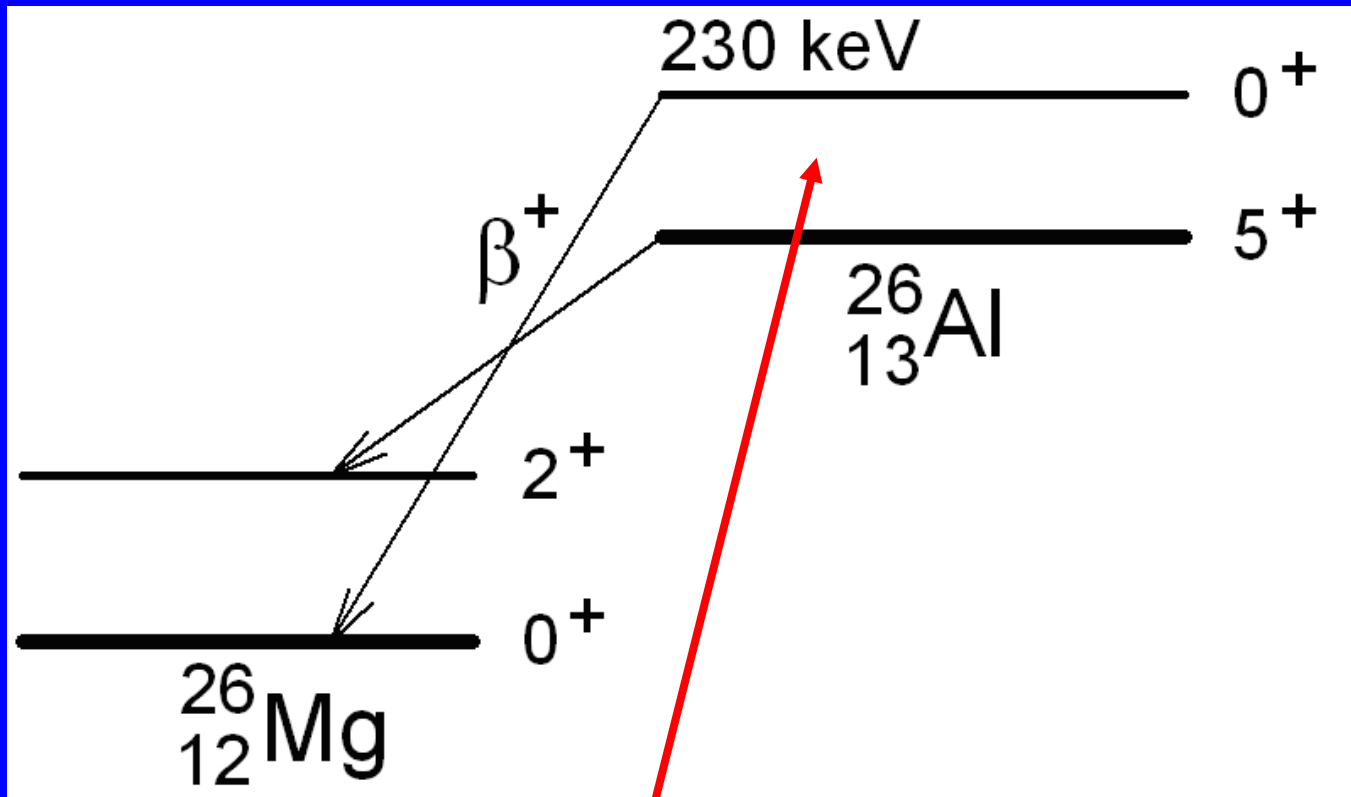


Przemiana γ



Widmo promieniowania emitowanego w rozpadzie z nuklidu ^{60}Co , obserwowane w detektorze Ge(Li)

Izomeria



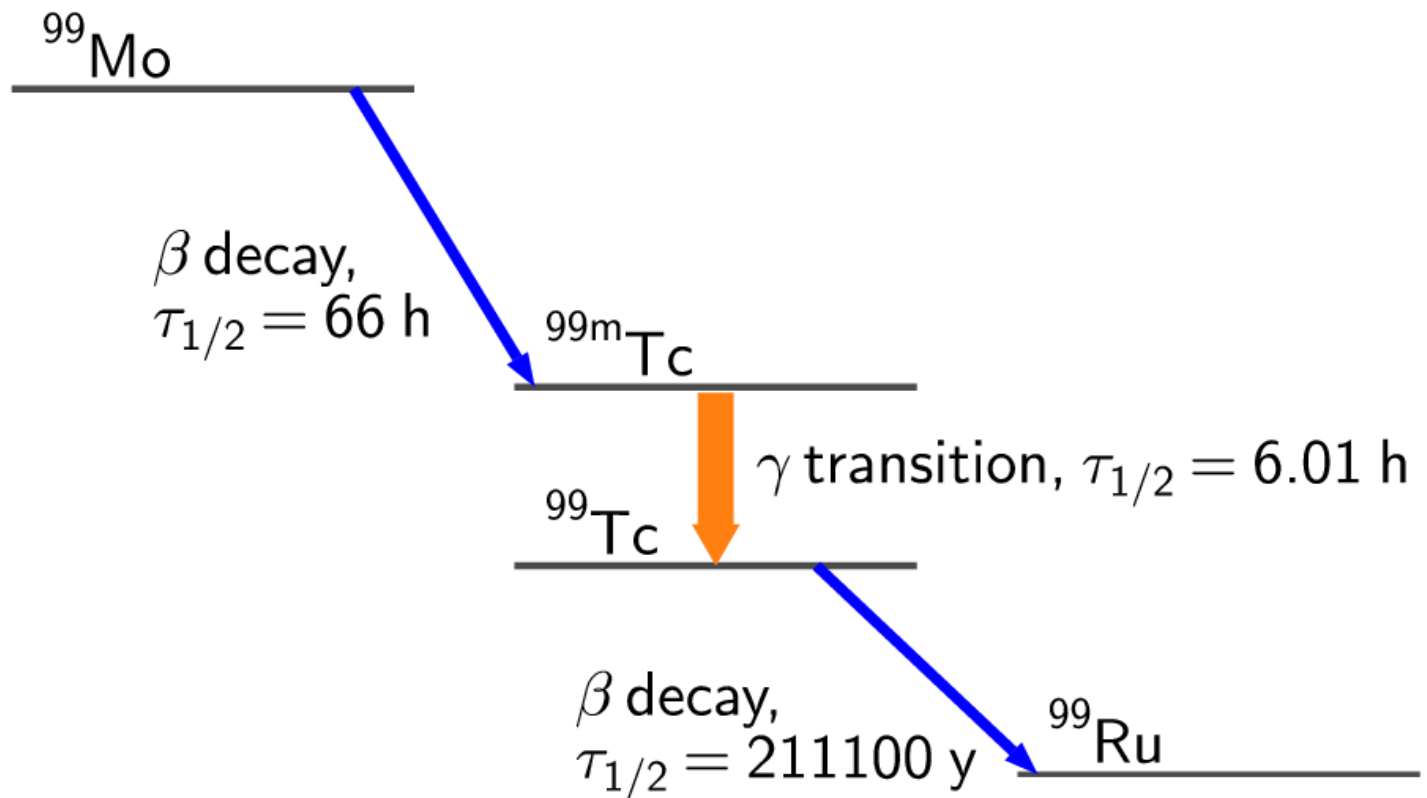
Wzbronione przejście γ ($L=5$) - rozpad β ze stanu wzbudzonego

Izomer ^{99m}Tc

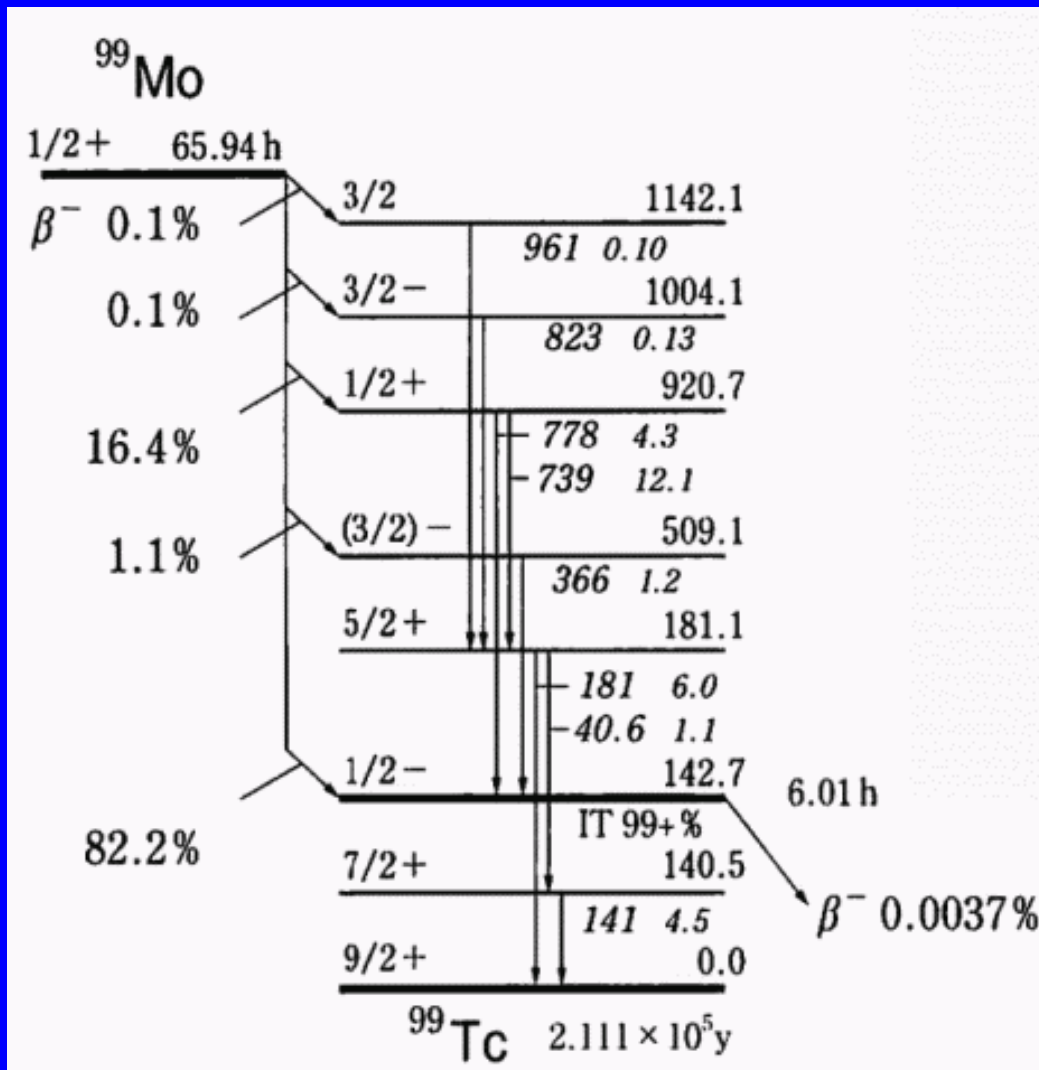
$T_{1/2} = 6.02$ godziny

Izomeryczne przejście γ

$E_\gamma : 0.141$ MeV (89.1 %)



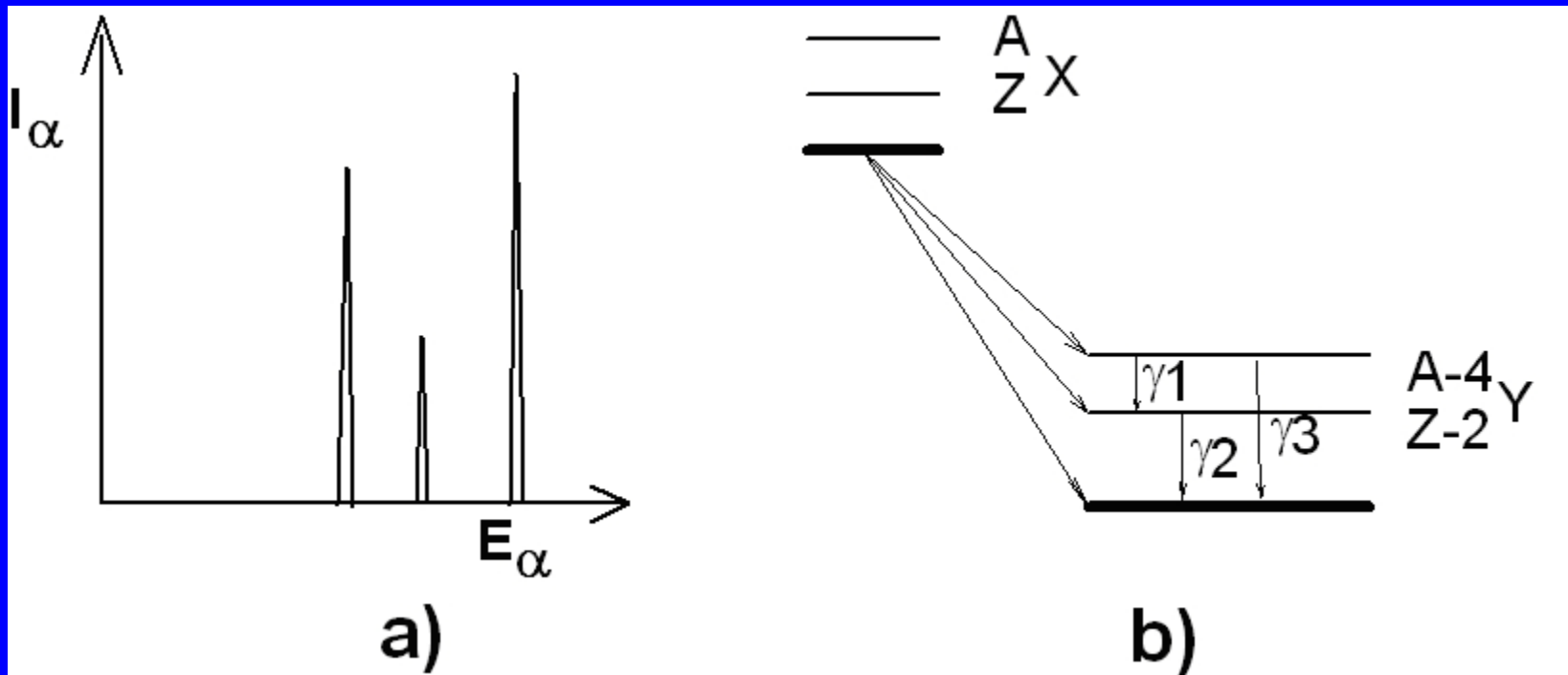
Izomer ^{99m}Tc – szczegóły schematu



Izomeryczne przejście γ w ^{99m}Tc ze stanu $1/2^-$ do $9/2^+$ silnie wzbronione

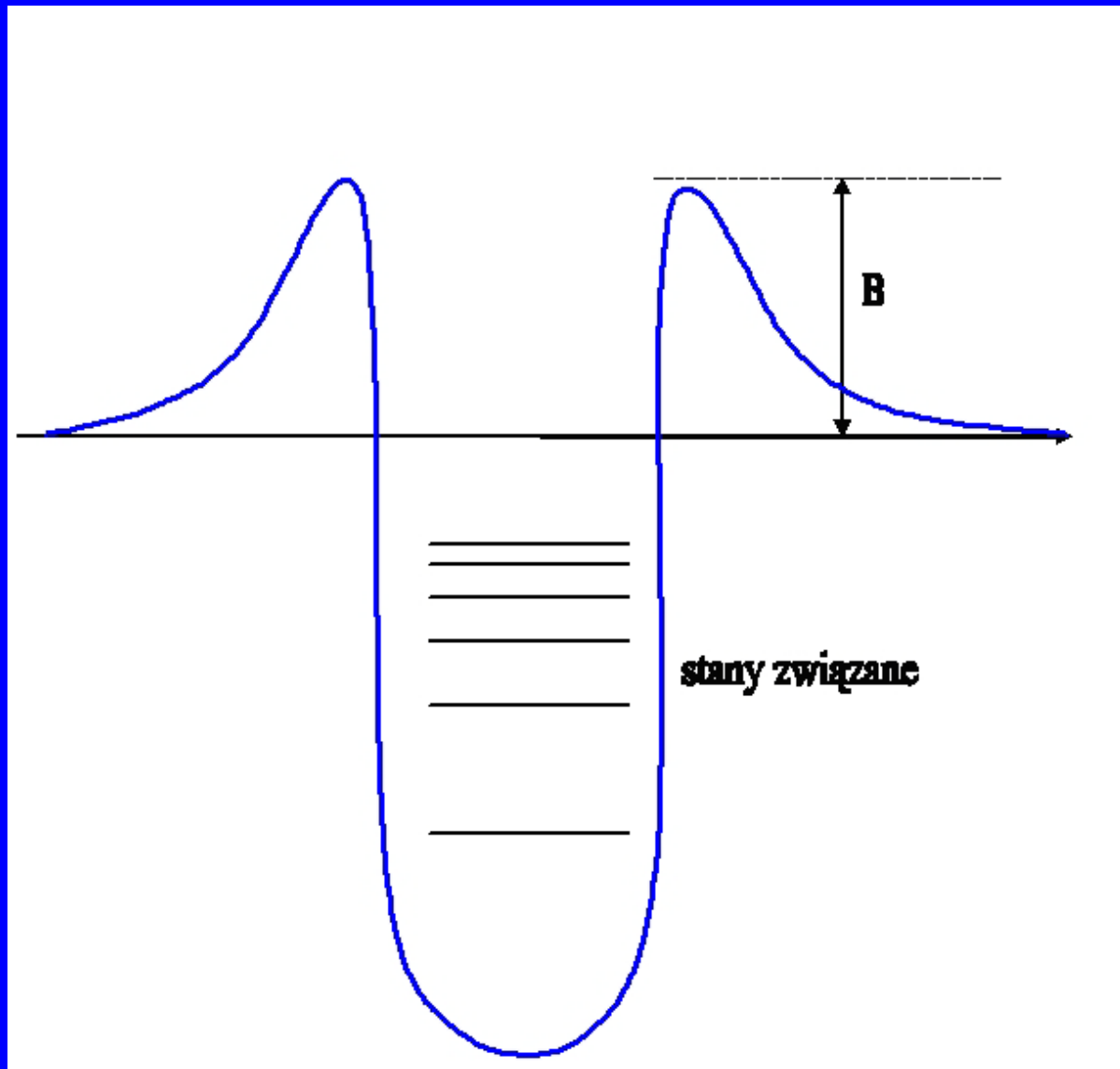
Przejście M4

Widma energetyczne z rozpadów α



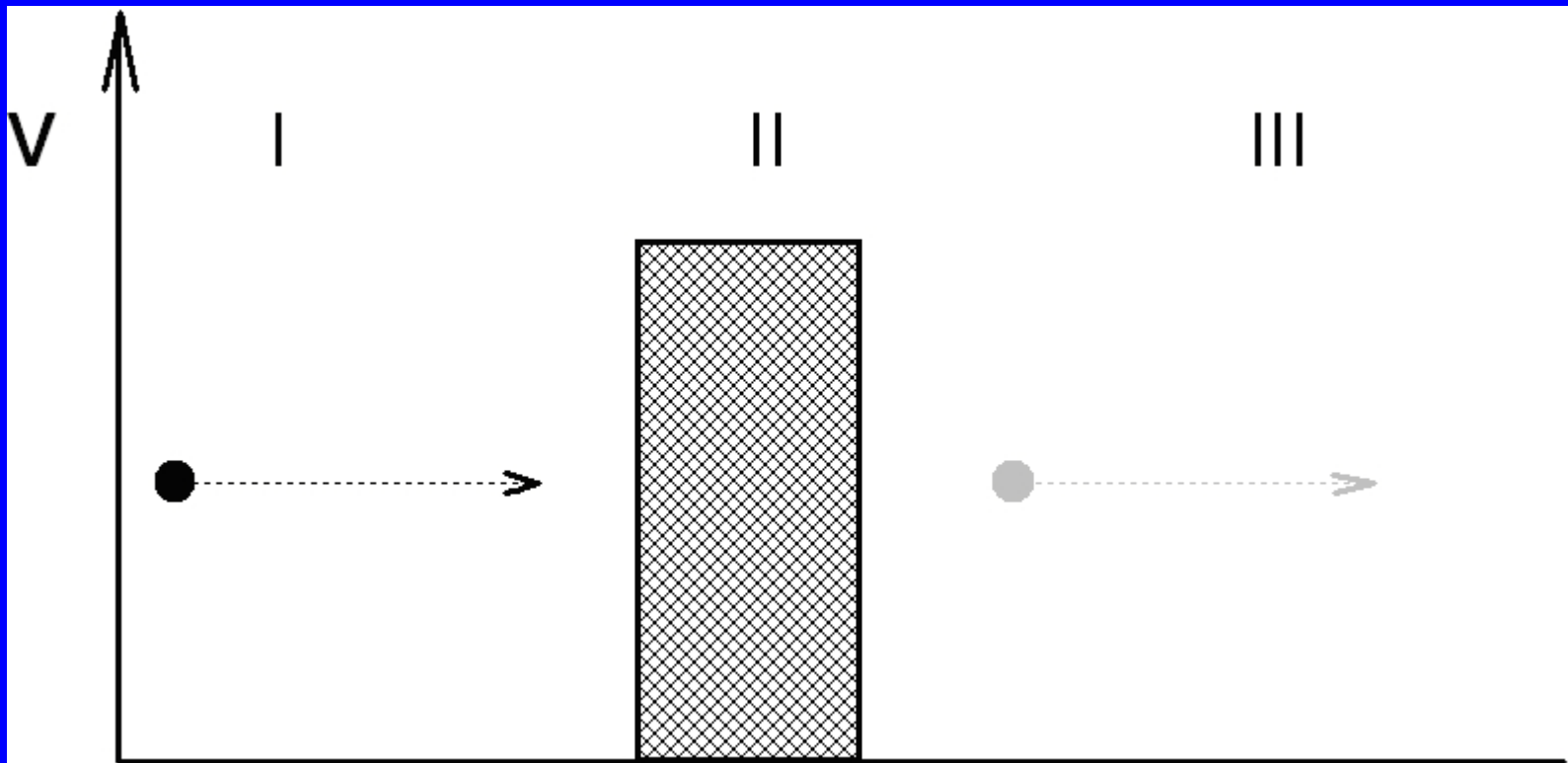
Rozpad jądra z emisją cząstki α jest procesem dwuciałowym, co stwierdzono badając widma energii cząstek, emitowanych z jąder promieniotwórczych. Rozpadowi α może towarzyszyć promieniowanie γ .

Rozpad α , transmisja przez barierę potencjału

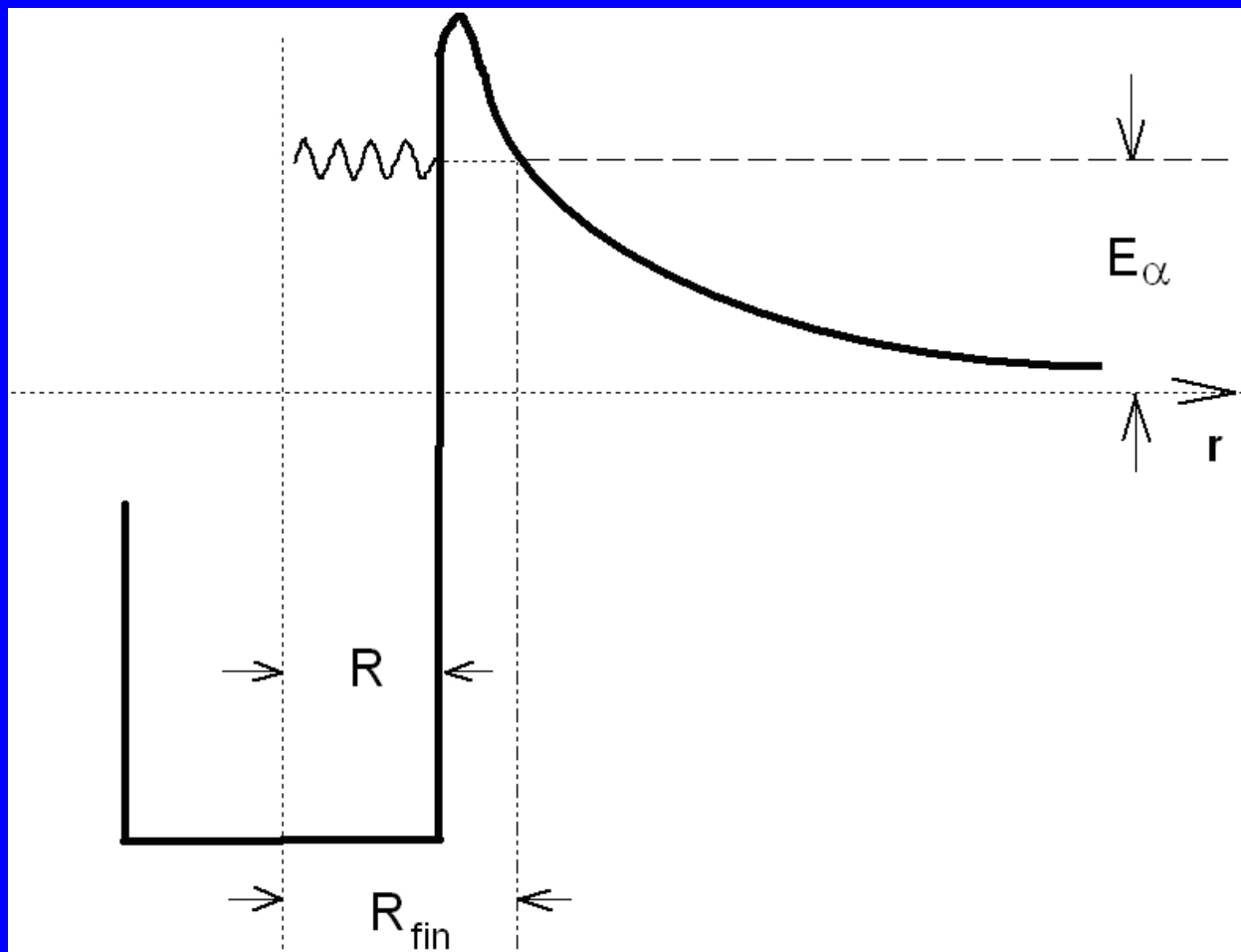


$$B_Z = \frac{Zze^2}{r_0 A^{1/3}}$$

Kwantowa transmisja



Dlaczego tylko wysokie energie?

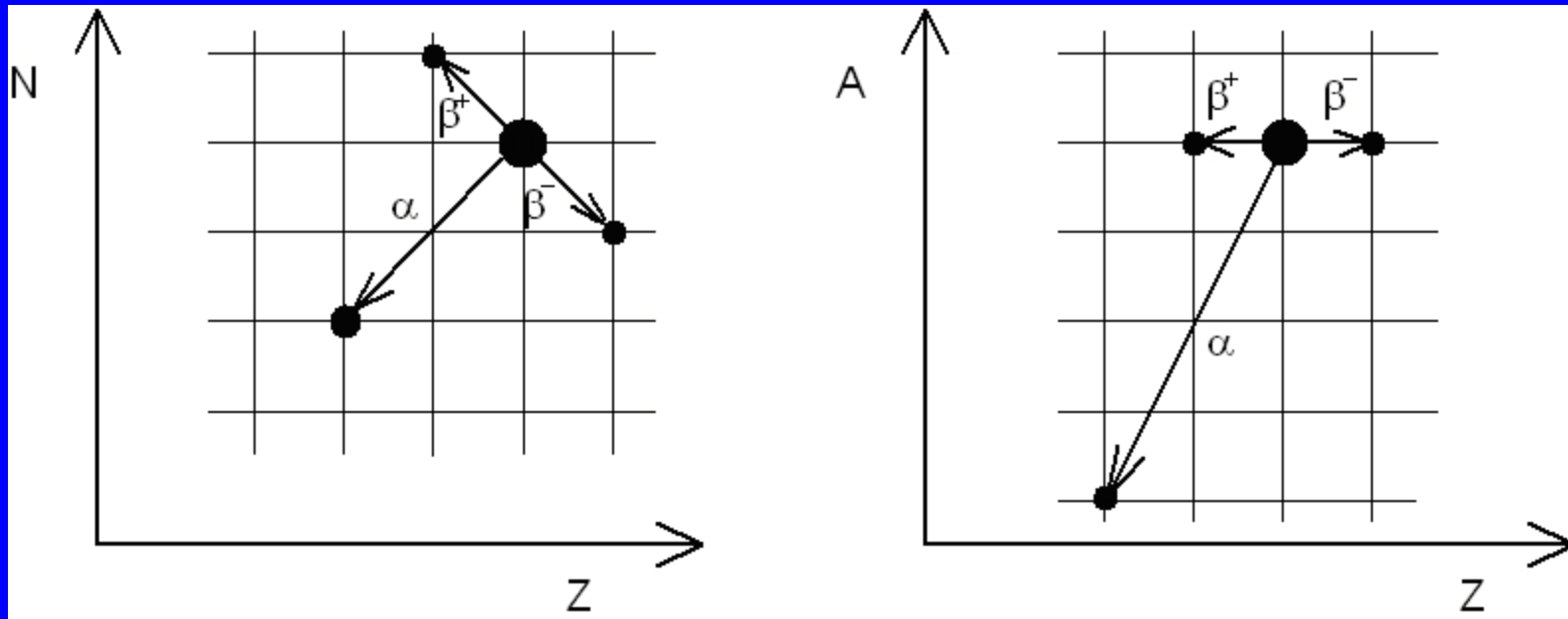


Wysokości barier i energie

Energie cząstek α , z zakresu 4-9 MeV

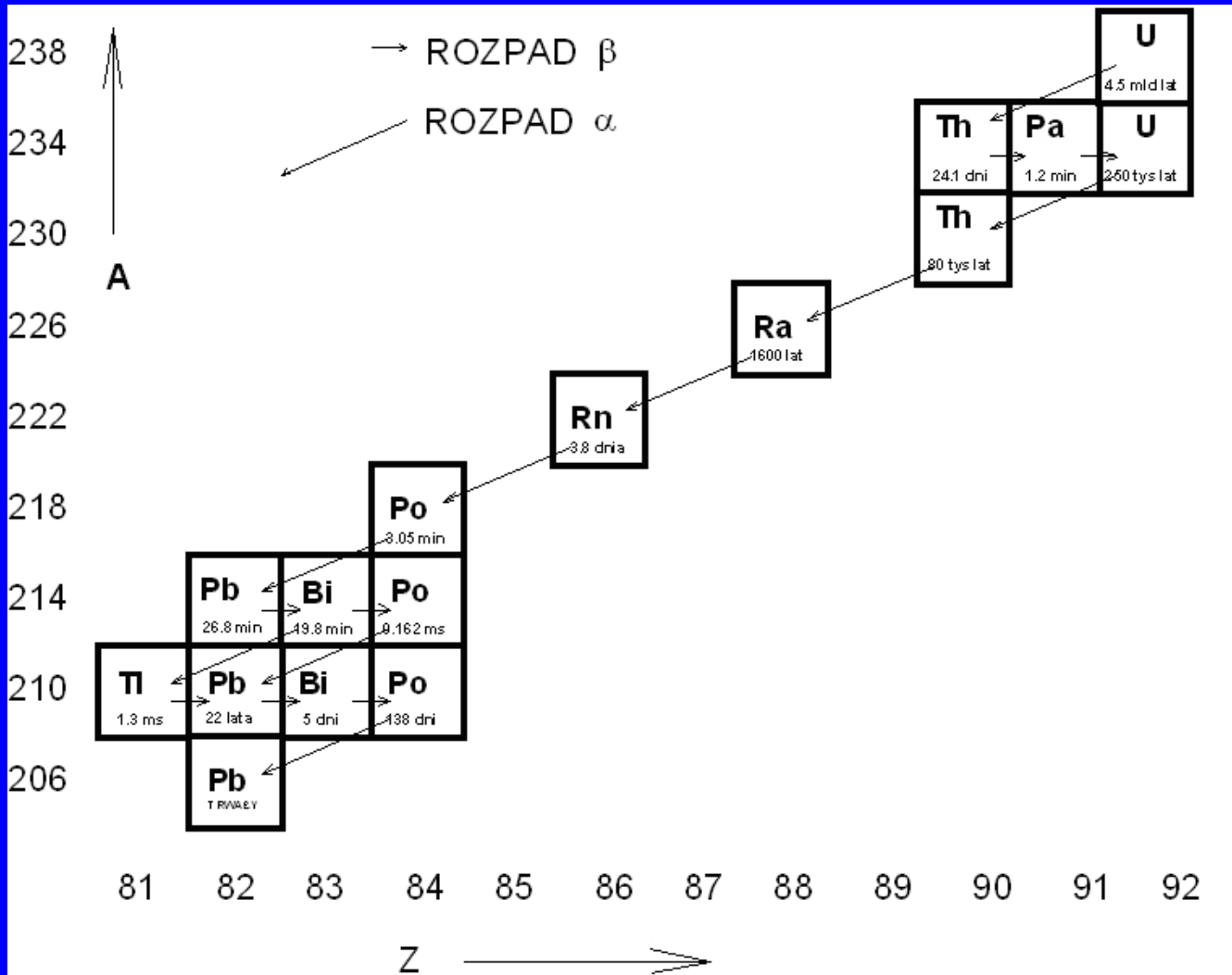
Jądro	Bariera dla protonów [MeV]	Bariera dla cząstek α [MeV]
O	3.5	7
Sn	10	20
U	15	30

Ilustracja graficzna rozpadów



Ilustracja graficzna rozpadów i na płaszczyznach (Z,N) i (Z,A)

Szeregi promieniotwórcze



Łańcuch promieniotwórczy uranowo-actyniowy ($A = 4k + 2$)

Szeregi promieniotwórcze

Istnieją cztery takie rodziny promieniotwórcze; ich liczba wynika stąd, że cząstka składa się z czterech nukleonów, a tylko rozpad α zmienia liczbę nukleonów (właśnie o cztery!).

Cztery możliwe łańcuchy promieniotwórczych pierwiastków mogą mieć zatem liczby masowe, $A = 4k, 4k+1, 4k+2, 4k+3$, gdzie k jest liczbą całkowitą

Wybrane parametry szeregów promieniotwórczych

Nazwa łańcucha	A	T _{1/2} [lat]	Pierwsze jądro szeregu	Jądro kończące szereg		
				nazwa	Z	N
torowy	4k	$1.4 \cdot 10^{10}$	${}_{90}^{232}\text{Th}$	${}_{82}^{208}\text{Pb}$	82	126
neptunowy	4k+1	$2.2 \cdot 10^6$	${}_{93}^{237}\text{Np}$	${}_{83}^{209}\text{Bi}$	83	126
uranowo-radowy	4k+2	$4.5 \cdot 10^9$	${}_{92}^{238}\text{U}$	${}_{82}^{206}\text{Pb}$	82	124
uranowo-aktynowy	4k+3	$7.2 \cdot 10^8$	${}_{92}^{235}\text{U}$	${}_{82}^{207}\text{Pb}$	82	127

Rozpady sekwencyjne



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

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2$$

Rozwiązania:

$$N_1 = N_{01} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{02} e^{-\lambda_2 t}$$

$$N_3 = N_{01} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) + N_{02} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + N_{03}$$

Rozpady sekwencyjne

Bardzo często mamy do czynienia z przypadkiem, gdy na początku mamy tylko jądra N_1 . Wtedy $N_{02} = 0$ i $N_{03} = 0$, a rozwiązania opisujące liczby jąder 2 i 3 w rozpadzie sekwencyjnym są znacznie prostsze:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right)$$

$$N_3 = N_{01} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right)$$

W przemianach sekwencyjnych często przeplatają się rozpady różnych rodzajów

Równowaga produktów rozpadu (radon jako przykład)

Jak można zauważyć, w rodzinie uranowo-radowej, pierwsze elementy łańcucha uran, tor i rad mają bardzo długie okresy połowicznego zaniku. Uran - 4,5 mld lat, tor - 80 tys. lat i rad 1600 lat. Produktem rozpadu radu, ^{226}Ra jest gaz szlachetny radon - ^{222}Rn . Widzimy, że ostatni w łańcuchu – radon rozpada się znacznie szybciej, niż macierzysty rad. Mamy więc związki między stałymi rozpadu: $\lambda(\text{Ra}) = \lambda_1 \ll \lambda(\text{Rn}) = \lambda_2$, ponieważ okres połowicznego zaniku radu $T_{1/2} = 1600$ lat, co jest bardzo dużym czasem w porównaniu czasami eksperymentów, można przyjąć, że stała rozpadu radu jest bardzo mała i wynosi $\lambda(\text{Ra}) = \lambda_1 \approx 0$. Stąd aktywność radu można przybliżyć, przyjmując,

że $e^{-\lambda_1 t} \cong 1$

$$A_1 = \frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 = \lambda_1 N_{01} e^{-\lambda_1 t} \cong \lambda_1 N_{01} = \text{const}$$

Równowaga produktów rozpadu

Aktywność radonu będziemy wyliczać w oparciu o równanie, które uwzględnia nie tylko rozpad substancji pochodnej N_2 , ale i jej narastanie ze względu na rozpad substancji macierzystej

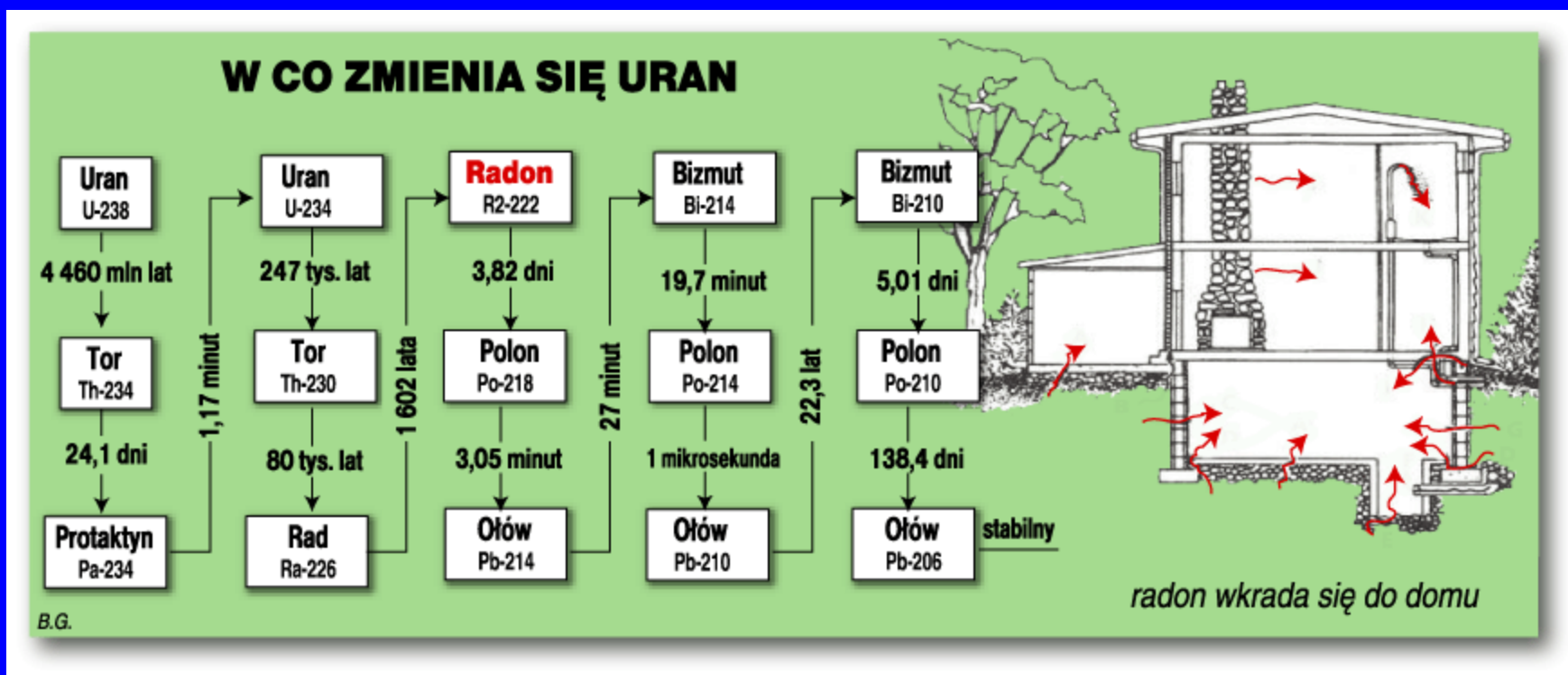
$$A_2 = \lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \cong \lambda_1 N_{01} (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

Z analizy wyrażenia opisującego zależność $A_2(t)$ widzimy, że aktywność początkowo narasta, aby po kilku okresach połowicznego zaniku osiągnąć aktywność substancji macierzystej.

$$A_2 \cong \lambda_1 N_{01} = A_1$$

w naszym przypadku aktywność radonu jest równa aktywności radu, a ponieważ poprzedzające nuklidy w szeregu mają coraz dłuższe okresy połowicznego zaniku, o aktywności radonu będzie decydowała aktywność pierwszego elementu szeregu promieniotwórczego – ^{238}U .

Radon - element szeregu rozpadu promieniotwórczego uranu



Radon

- symbol Rn, $Z=86$;
- bezbarwny i bezwonny gaz;
- główne źródło promieniowania jonizującego na Ziemi;
- izotopy ^{222}Rn , ^{220}Rn i ^{219}Rn ;
- izotop ^{222}Rn i produkty jego rozpadu są źródłem 40% promieniowania jonizującego, na jakie jesteśmy narażeni

Gdzie jest radon?

Aktywność radonu (w Bq/m³) w naszym otoczeniu - dane orientacyjne .

Miejsce pomiaru	Aktywność [Bq/m³]
powietrze przy gruncie	10
wietrzony pokój	40
pokój zamknięty	80
piwnica	400
pieczara	10000