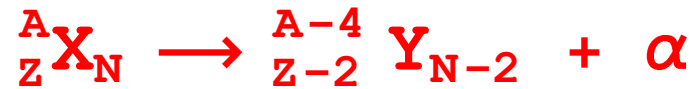


α , β , γ -разпадания

α -разпадане

Основни закономерности

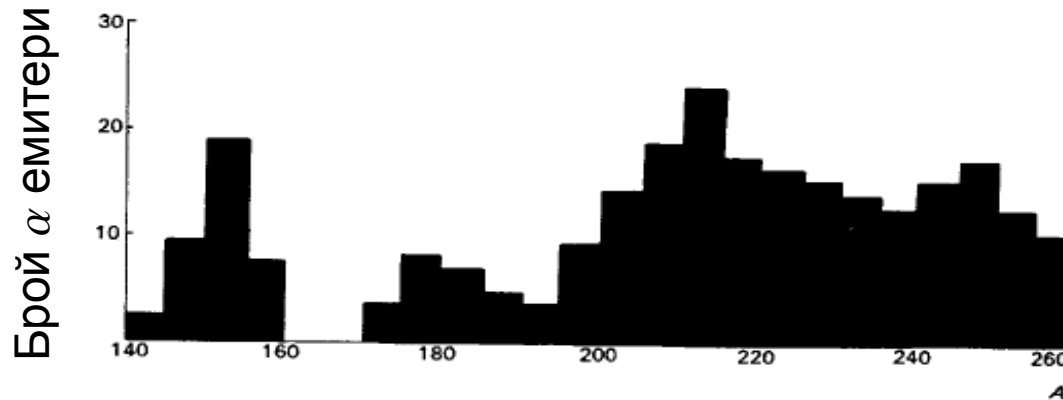


$\alpha \equiv {}^4_2\text{He}_2$ (1909 – Rutherford)

Кулонов ефект

тежки ядра

$$B(N, Z) = a_{\text{vol}} A - a_{\text{surf}} A^{2/3} - a_c Z(Z-1) A^{-1/3} - a_{\text{sym}} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta$$



Най-леките α емитери

${}^{105,106}\text{Te}$, ${}^{144}\text{Nd}$

слоести ефекти

основно $A > 170$

Спонтанен процес – отделяне на енергия (кинетична) без външно въздействие!

α -разпада минимизира вътрешната енергията на дъщерната с-ма:

$$E_i - E_f > 0$$

Енергетично условие



$$m_X c^2 = m_Y c^2 + T_Y + m_\alpha c^2 + T_\alpha \quad (m_X - m_Y - m_\alpha) c^2 = T_Y + T_\alpha$$

$$Q = \sum_i M_i (A, Z) - \sum_f M_f (A, Z) \quad \text{- енергията отделена при процеса}$$

$Q > 0$ екзотермични

$Q < 0$ ендотермични

$$Q = T_Y + T_\alpha$$

Спонтанен разпад се наблюдава само за $Q > 0$

$$Q = m_X - m_Y - m_\alpha > 0$$

$$m_X - m_Y > m_\alpha$$

$$m = \Delta m + A c^2 \quad c^2 = 931.5 \text{ MeV} / u$$

$$Q = \Delta m_X + A c^2 - \Delta m_Y - (A - 4) c^2 - \Delta m_\alpha - 4 c^2$$

$$= \Delta m_X - \Delta m_Y - \Delta m_\alpha > 0$$

$$m(N, Z) = N m_n + Z m_p - \frac{1}{c^2} B(N, Z)$$

$$Q = B(2, 2) + B(N-2, Z-2) - B(N, Z) \quad B(2, 2) > B_X(N, Z) - B_Y(N-2, Z-2)$$

Защо се излъчва α -частица, а не нещо друго?

${}^{232}_{92}\text{U}_{140}$	$(\Delta m = 34.61 \text{ MeV}, B/A = 7.6 \text{ MeV}) \rightarrow X (\Delta m, B/A) + x (\Delta m, B/A)$	
${}^{231}_{91}\text{Pa}_{140}$	$(33.43 \text{ MeV}, 7.62 \text{ MeV}) + {}^1_1\text{H}_0 (7.29 \text{ MeV}, 0)$	$Q = -6.11 \text{ MeV}$
${}^{231}_{92}\text{U}_{139}$	$(33.81 \text{ MeV}, 7.61 \text{ MeV}) + {}^1_0\text{H}_1 (8.07 \text{ MeV}, 0)$	$Q = -7.27 \text{ MeV}$
${}^{230}_{91}\text{Pa}_{139}$	$(32.17 \text{ MeV}, 7.62 \text{ MeV}) + {}^2_1\text{H}_1 (13.14 \text{ MeV}, 1.11 \text{ MeV})$	$Q = -10.7 \text{ MeV}$
${}^{229}_{90}\text{Th}_{139}$	$(29.59 \text{ MeV}, 7.63 \text{ MeV}) + {}^3_2\text{He}_1 (14.93 \text{ MeV}, 2.57 \text{ MeV})$	$Q = -9.91 \text{ MeV}$
${}^{228}_{90}\text{Th}_{138}$	$(26.77 \text{ MeV}, 7.65 \text{ MeV}) + {}^4_2\text{He}_2 (2.42 \text{ MeV}, 7.07 \text{ MeV})$	$Q = +5.42 \text{ MeV}$
${}^{227}_{90}\text{Th}_{137}$	$(25.81 \text{ MeV}, 7.64 \text{ MeV}) + {}^5_2\text{He}_3 (11.39 \text{ MeV}, 5.48 \text{ MeV})$	$Q = -2.59 \text{ MeV}$
${}^{225}_{89}\text{Ac}_{136}$	$(21.64 \text{ MeV}, 7.67 \text{ MeV}) + {}^7_3\text{Li}_4 (14.91 \text{ MeV}, 5.61 \text{ MeV})$	$Q = -1.94 \text{ MeV}$
$\lambda_{24\text{Ne}} / \lambda_{\alpha} \sim 10^{-12}$		
${}^{224}_{88}\text{Ra}_{136}$	$(18.83 \text{ MeV}, 7.68 \text{ MeV}) + {}^8_4\text{Be}_4 (4.94 \text{ MeV}, 7.06 \text{ MeV})$	$Q = +10.84 \text{ MeV}$
${}^{220}_{86}\text{Rn}_{134}$	$(10.61 \text{ MeV}, 7.17 \text{ MeV}) + {}^{12}_6\text{C}_6 (0 \text{ MeV}, 7.68 \text{ MeV})$	$Q = +24 \text{ MeV}$
${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$	$(-21.75 \text{ MeV}, 7.87 \text{ MeV}) + {}^{24}_{10}\text{Ne}_{14} (-5.95 \text{ MeV}, 7.99 \text{ MeV})$	$Q = +62.31 \text{ MeV}$

α - относително леки, силно свързани (+ голяма вероятност за разпад) \Rightarrow излъчването на α води до отделяне на максимално количество кинетична енергия

Откатна енергия на дъщерното ядро



$$Q = T_Y + T_\alpha$$

$$p_\alpha = p_Y \quad T = \frac{p^2}{2m}$$

$$m_\alpha T_\alpha = m_Y T_Y$$

$$T_\alpha = \frac{Q}{\left(1 + \frac{m_\alpha}{m_Y}\right)} = \frac{Q}{\left(1 + \frac{4}{A_Y}\right)}$$

98 %

$$T_Y = \frac{Q}{\left(1 + \frac{m_Y}{m_\alpha}\right)}$$

2 %

$$Q \sim 5 \text{ MeV} \Rightarrow T_Y \sim 100 \text{ keV}$$

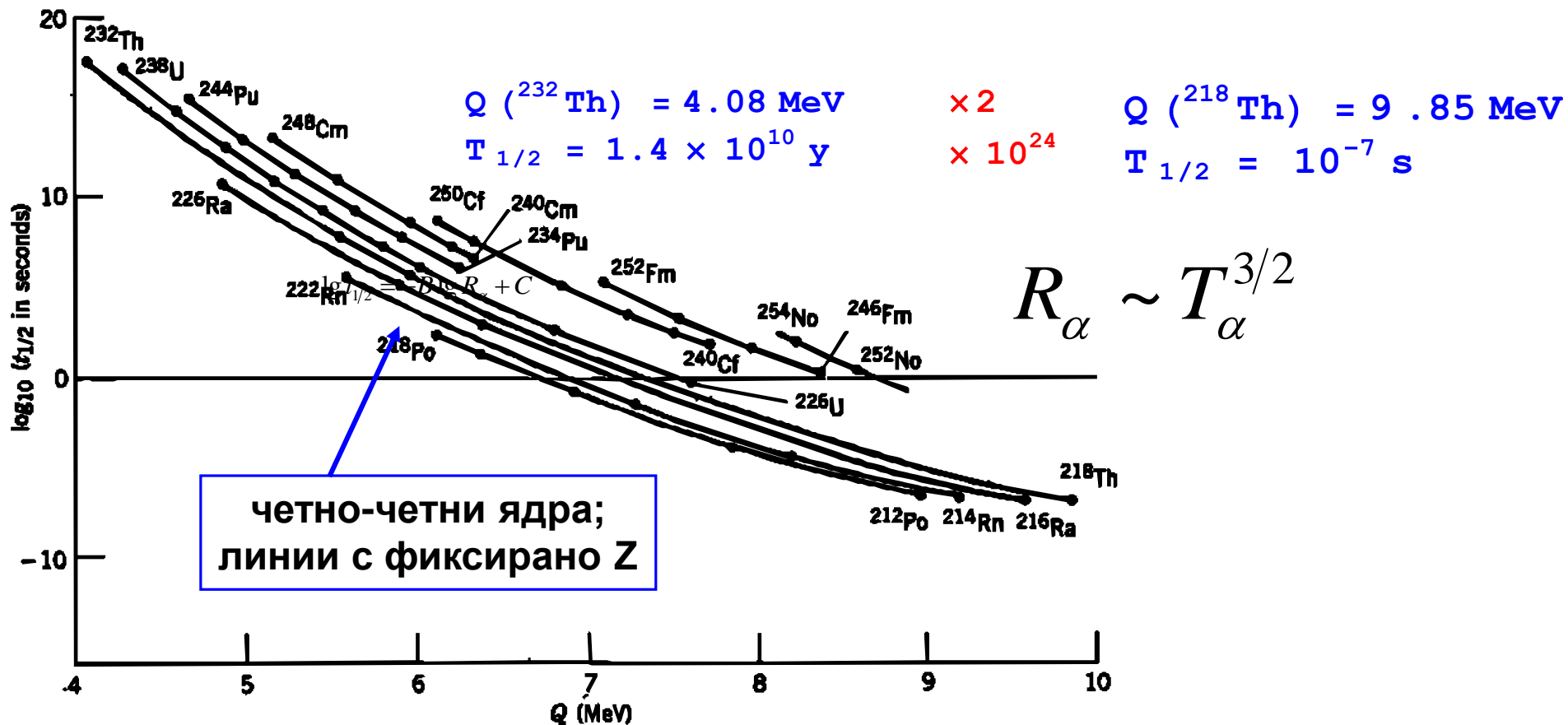
Закон на Geiger-Nuttall

Големи Q фактори \Rightarrow кратки времена на живот!

Голям Q
фактор \Rightarrow

Голяма разлика в $B(Z,N)$ за
родителското и дъщерното \Rightarrow
ядро

Родителското ядро
е по-нестабилно,
т.е. по-лесно се
разпада

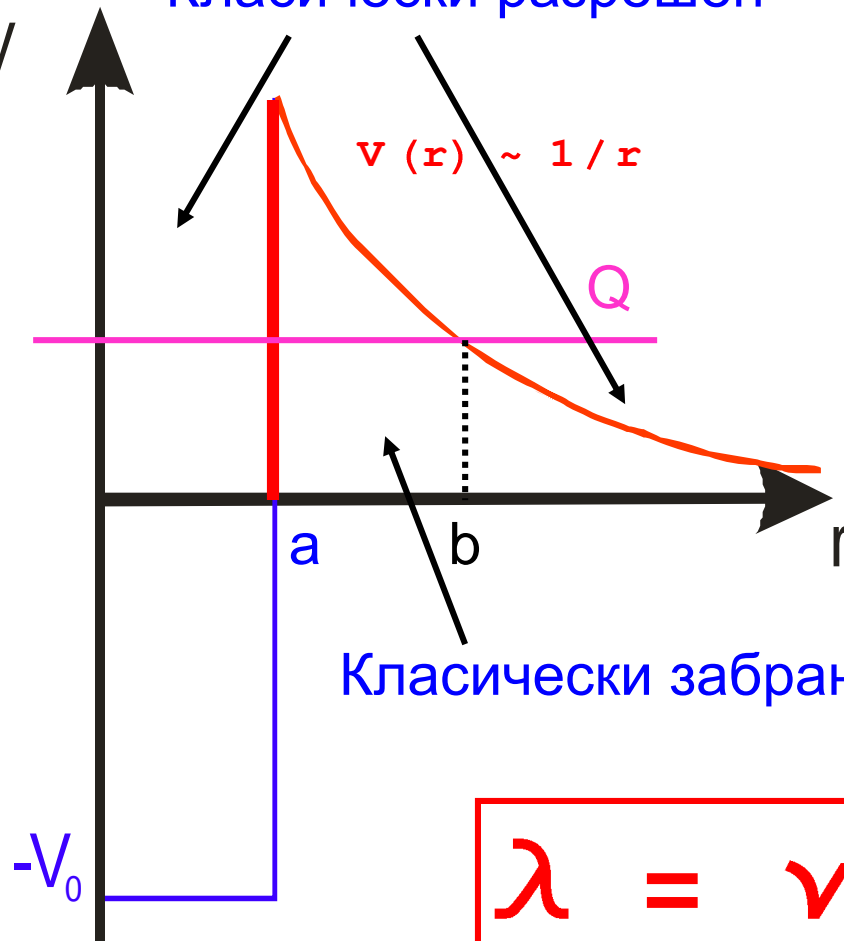


Квантово описание на α -разпада

Тунелиране през ядрения кулонов бариер (Gamow, Gurney, Condon 1928)

Класически разрешен

Приближения



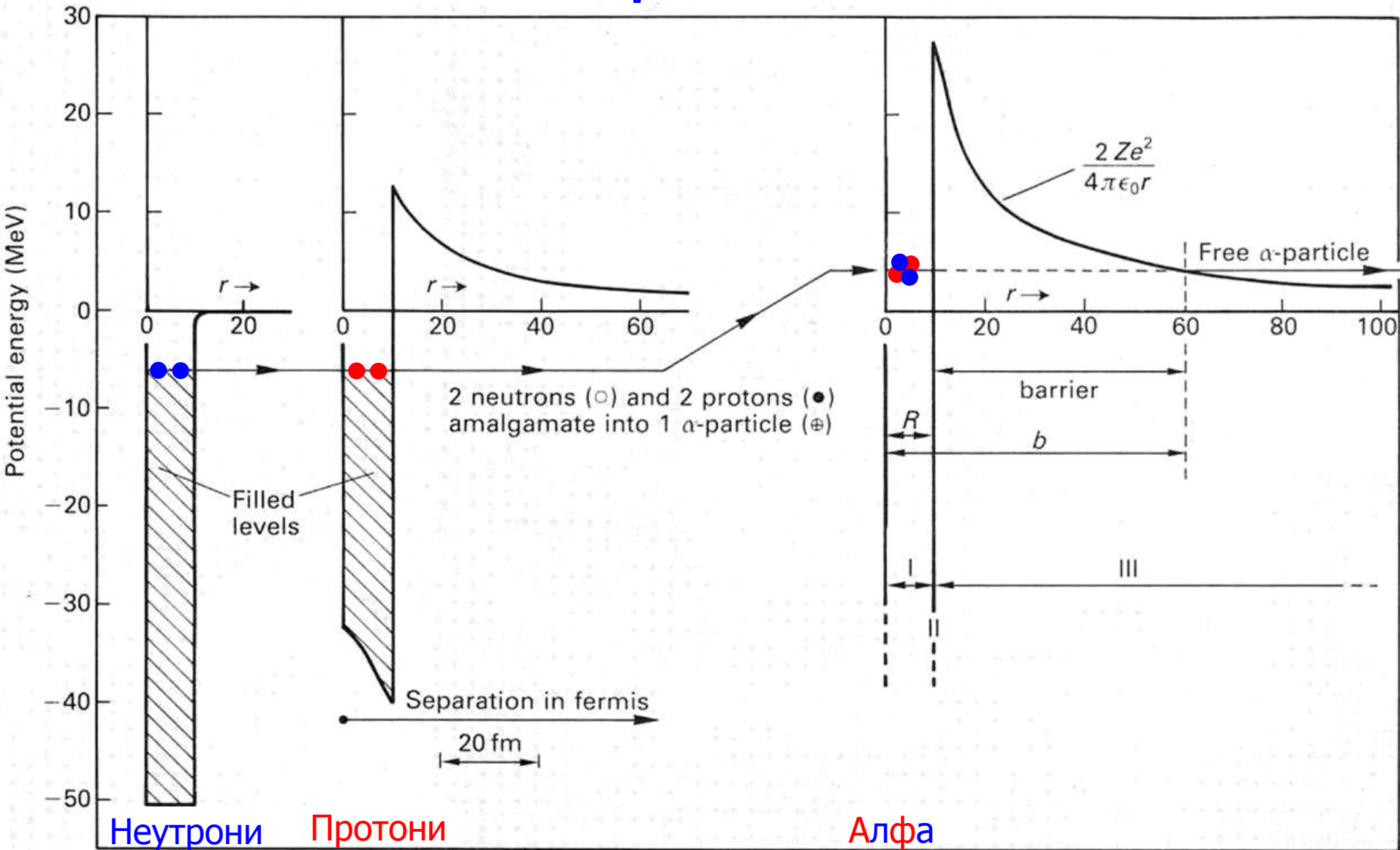
- α частицата се формира в ядрото
- За $r < a$ само ядрен потенциал – сферично симетрична правоъгълна яма с широчина a
- За $r > a$ Кулонов потенциал
- енергията на α -частицата е равна на Q фактора на разпада

$$\lambda = \nu T$$

ν – честота на ударите с бариера

T – прозрачност на бариера

α-разпад

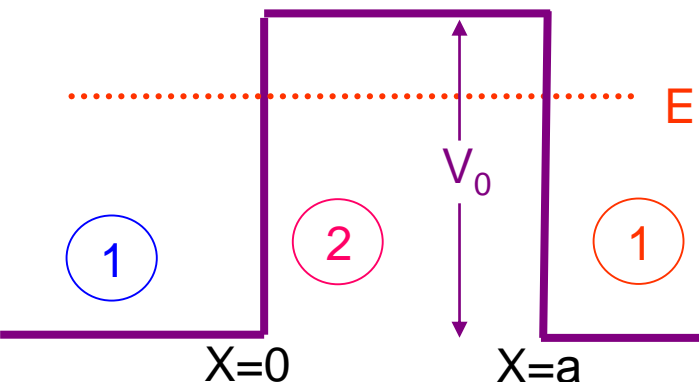


Централен потенциал

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r) Y(\theta, \phi)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dR}{dr} \right) + \left[V(r) + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2} \right] R = ER$$

Приближение: $l = 0 \Rightarrow$ едномерна задача за тунелиране



$$V(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ V_0 & 0 \leq x \leq a \\ 0 & x > a \end{cases}$$

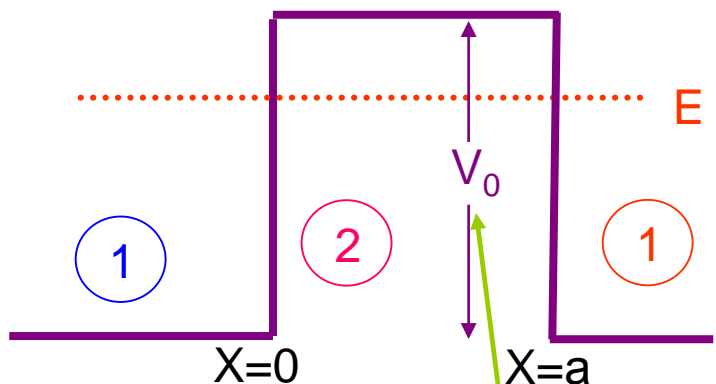
$$\psi_1(x) = A \cdot e^{ik_1 x} + B \cdot e^{-ik_1 x}, \quad k_1 = \sqrt{2mE} / \hbar$$

$$\psi_2(x) = C \cdot e^{k_2 x} + D \cdot e^{-k_2 x}, \quad k_2 = \sqrt{2m(V_0 - E)} / \hbar$$

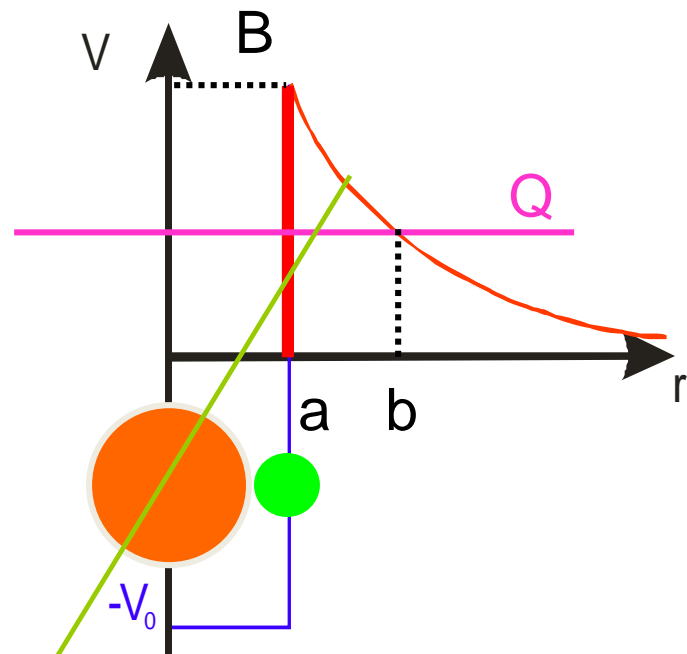
$$\psi_3(x) = F \cdot e^{ik_3 x}, \quad k_3 = \sqrt{2mE} / \hbar$$

$$T = \frac{|F|^2}{|A|^2} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{V_0^2}{E(V_0 - E)} \sinh^2(k_2 a)}$$

Моделиране на бариера



$$T = \frac{|F|^2}{|A|^2} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{V_0^2}{E(V_0 - E)} \sinh^2(k_2 a)}$$



- енергия на α -частицата – $E = Q (\approx 6 \text{ MeV})$
- маса на α -частицата – $m \sim 4 \text{ amu}$
- начало на потенциала – $a = R_Y + R_\alpha = 1.2 (200^{1/3} + 4^{1/3}) \approx 9 \text{ fm}$
- височина на бариера: $B = V_c (r = a) = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{zZ'}{a}$
 $= 1.44 \text{ MeV fm} \frac{2 (88)}{9 \text{ fm}} \approx 28 \text{ MeV}$

Приближение: $V_0 = \frac{1}{2} (B + Q)$

- край на бариера: $\frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{zZ'}{b} = Q \quad b = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{zZ'}{Q} \approx 42 \text{ fm}$

$$\frac{b - a}{2} = \frac{42 - 9}{2} \text{ fm} \approx 16 \text{ fm}$$

Приближение:

- $k_2 = \sqrt{2 m (0.5 (B + Q) - Q) / \hbar^2} = \sqrt{(m / \hbar^2) (B - Q)}$

$$\approx \sqrt{((4.0026 \times 931.5 \text{ MeV}) / (197 \text{ MeV fm})^2) 22 \text{ MeV}} = 1.45 \text{ fm}^{-1}$$

$$k_2 \cdot \frac{b - a}{2} \gg 1 \quad \sinh \left(k_2 \cdot \frac{b - a}{2} \right) \approx \frac{e^{k_2 \cdot 1/2 (b-a)}}{2}$$

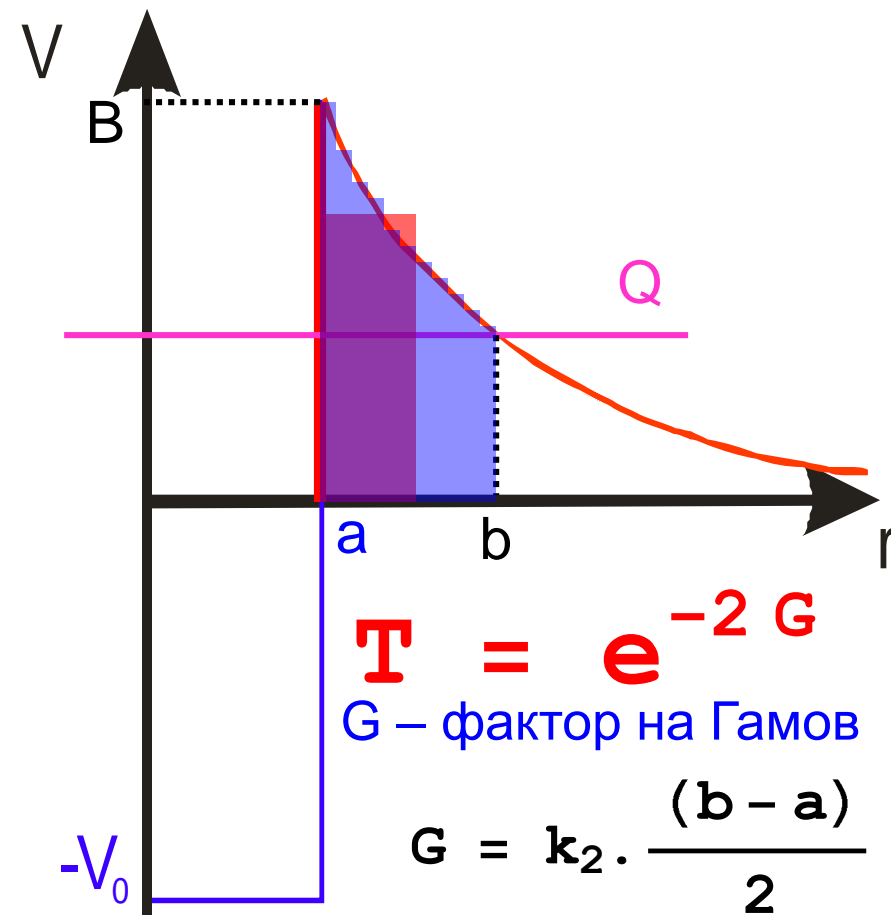
$$T \approx \frac{1}{1 + \frac{e^{k_2 \cdot (b-a)}}{4}} \approx e^{-2 \cdot k_2 \cdot \frac{(b-a)}{2}} = 1.7 \times 10^{-21}$$

$$T (Q = 6 \text{ MeV}) = 1.7 \times 10^{-21} \quad \longleftrightarrow \quad T (Q = 5 \text{ MeV}) = 7 \times 10^{-28}$$

$$Q = 5 \text{ MeV}$$

$$b = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{zZ'}{Q} \approx 51 \text{ fm} \quad k_2 = \sqrt{(m / \hbar^2) (B - Q)} = 1.49 \text{ fm}^{-1}$$

Какво направихме дотук?



$$T = e^{-2G}$$

G – фактор на Гамов

$$G = k_2 \cdot \frac{(b-a)}{2}$$

- приехме, че α -частицата се формира вътре в **родителското** ядрото и се движи **независимо** в полето на **дъщерното** ядро, т.е. системата е **“дъщерно ядро + α ”**
- приехме, че цялата освободена енергия се отнася от α -частицата
- моделирахме Кулоновия потенциал като стъпков със височина $(B+Q)/2$ и широчина $(a-b)/2$

$$T = T_1 \times T_2 \times T_2 \dots \times T_n$$

$$T_i = \exp \left(-2 \Delta r_i \sqrt{(2m/\hbar^2) (V(r) - Q)} \right) \quad T = \exp \left(-2 \sum_{i=1}^n \Delta r_i \sqrt{(2m/\hbar^2) (V(r) - Q)} \right)$$

$$G = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}} \int_a^b [V(r) - Q]^{1/2} dr$$

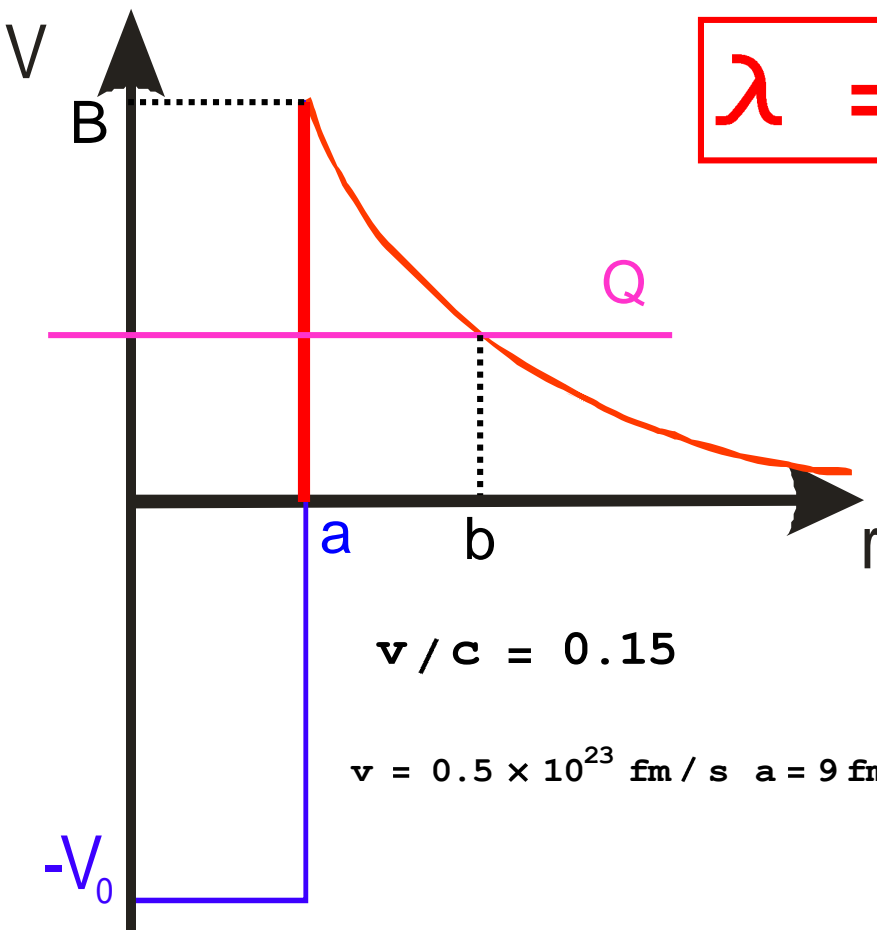
$$G = \sqrt{\frac{2m}{Q\hbar^2}} \frac{ZZ' e^2}{4\pi\epsilon_0} [\arccos(\sqrt{x}) - \sqrt{x(1-x)}]$$

$$G = \sqrt{\frac{2m}{Q\hbar^2}} \frac{ZZ' e^2}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\pi}{2} - 2\sqrt{x} \right]$$

$$x = a/b = Q/B \ll 1$$

Вероятност за преход

$$\lambda = \nu T$$



$$Q - V_0 = \frac{mv^2}{2} \quad \begin{array}{l} \nu - \text{скорост на } \alpha\text{-частицата} \\ \text{вътре в ядрото} \end{array}$$

$$V_0 = -35 \text{ MeV}, \quad Q = 5 \text{ MeV}$$

$$80 \text{ MeV} = 3728 \text{ MeV} \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

$$\nu = \frac{0.5 \times 10^{23} \text{ fm/s}}{9 \text{ fm}} \approx 6 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$$

$$\nu / c = 0.15$$

$$\nu = 0.5 \times 10^{23} \text{ fm/s} \quad a = 9 \text{ fm}$$

$$T(Q = 5 \text{ MeV}) = 7 \times 10^{-28}$$

$$\lambda(Q = 5 \text{ MeV}) = 4.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$$

$$t_{1/2} = 0.693 / \lambda = 1.7 \times 10^6 \text{ s}$$

$$T(Q = 6 \text{ MeV}) = 1.7 \times 10^{-21}$$

$$\lambda(Q = 6 \text{ MeV}) = 10 \text{ s}^{-1}$$

$$t_{1/2} = 0.693 / \lambda = 70 \text{ ms}$$

Резултати

$$t_{1/2} = 0.693 \frac{a}{c} \sqrt{\frac{mc^2}{2(V_0 + Q)}} \exp \left\{ 2 \sqrt{\frac{2mc^2}{(\hbar c)^2 Q}} \frac{ZZ' e^2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{Q}{B}} \right) \right\}$$

^{220}Th	$Q=8.95 \text{ MeV}$	$t_{1/2}^{\text{exp}} = 10^{-5} \text{ s}$	$t_{1/2}^{\text{th}} = 3.3 \cdot 10^{-7}$
^{222}Th	$Q=8.13 \text{ MeV}$	$t_{1/2}^{\text{exp}} = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ s}$	$t_{1/2}^{\text{th}} = 6.3 \cdot 10^{-5}$
^{224}Th	$Q=7.31 \text{ MeV}$	$t_{1/2}^{\text{exp}} = 1.04 \text{ s}$	$t_{1/2}^{\text{th}} = 3.3 \cdot 10^{-2}$
^{226}Th	$Q=6.45 \text{ MeV}$	$t_{1/2}^{\text{exp}} = 1845 \text{ s}$	$t_{1/2}^{\text{th}} = 6.0 \cdot 10^1$
^{228}Th	$Q=5.52 \text{ MeV}$	$t_{1/2}^{\text{exp}} = 6 \cdot 10^7 \text{ s}$	$t_{1/2}^{\text{th}} = 2.4 \cdot 10^6$
^{230}Th	$Q=4.77 \text{ MeV}$	$t_{1/2}^{\text{exp}} = 2.5 \cdot 10^{12} \text{ s}$	$t_{1/2}^{\text{th}} = 1.0 \cdot 10^{11}$
^{232}Th	$Q=4.08 \text{ MeV}$	$t_{1/2}^{\text{exp}} = 4.4 \cdot 10^{17} \text{ s}$	$t_{1/2}^{\text{th}} = 2.6 \cdot 10^{16}$

- не отчетохме вероятността за формиране на α -частица
- не отчетохме възможността за различни състояния в началната и крайната с-ма
 - не отчетохме влиянието на ъгловия момент
 - приехме, че ядрото е сферично \rightarrow 4-5% промяна \Rightarrow фактор 5

Причини за несъответствията :

Обяснение защо не виждаме разпади с други леки ядра



Четност и спин при α -разпад

Разпадът може да води до множество нива в дъщерното ядро

$$E_x, I^\pi$$

$$Q = T_\alpha - E_x$$

• спин-четност на основното състояние на ${}^4\text{He}$:

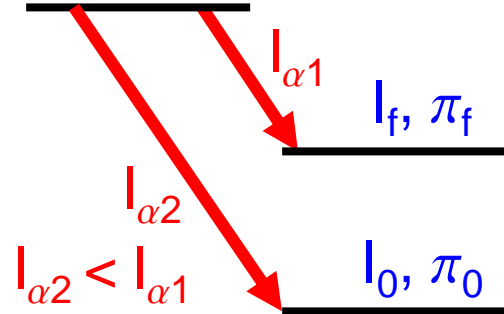
2 протона в $1s_{1/2} \Rightarrow j_\pi = 0$ 2 нейтрона в $1s_{1/2} \Rightarrow j_\nu = 0$ $I^\pi = 0^+$

• изменение на спина и четността на ядрото при разпада:

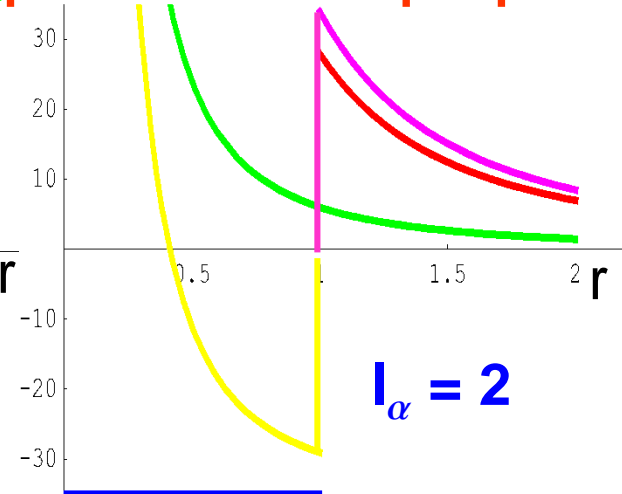
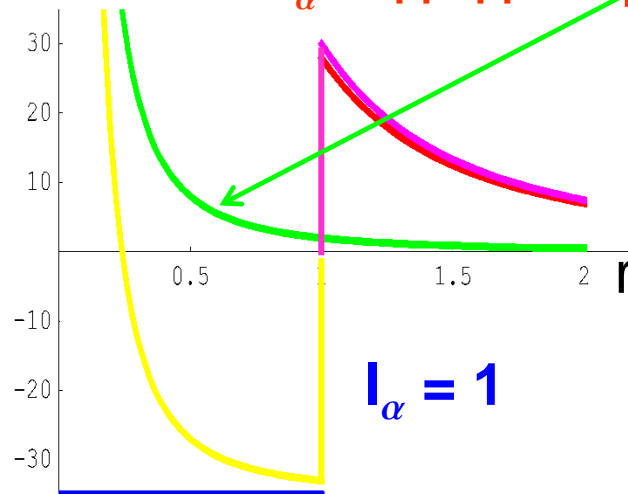
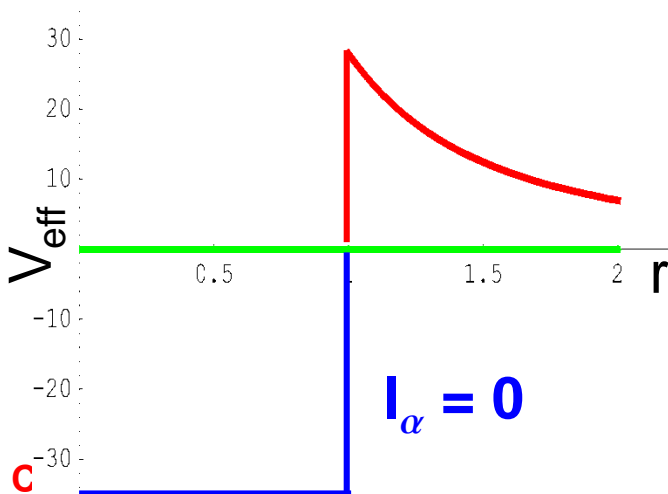
$$I_i, \pi_i \quad | I_i - I_f | \leq \Delta I \leq I_i + I_f \quad \Delta I \equiv I_\alpha \quad \boxed{\vec{I}_i = \vec{I}_f + \vec{I}_\alpha}$$

$$\pi_f \cdot \pi_i = \pi_\alpha = (-1)^{I_\alpha} \leftarrow \text{правила на отбор}$$

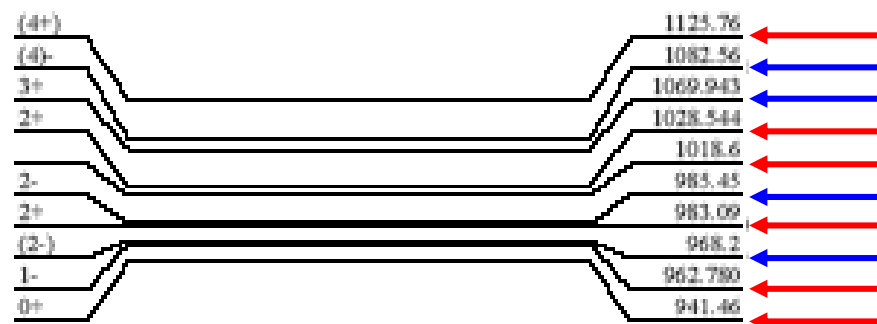
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dR}{dr} \right) + \left[V(r) + \frac{1(1+1)\hbar^2}{2mr^2} \right] R = ER$$



Увеличаването на I_α води до нарастване на бариера.



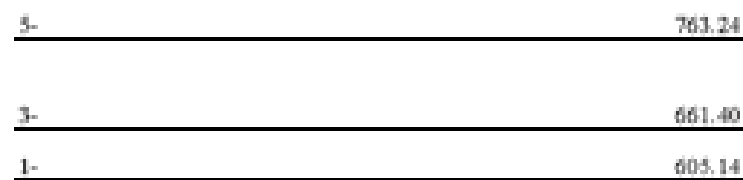
Приложение на правилата на отбор



$I_i = 0^+$ ^{242}Cm
 $Q = 6.216 \text{ MeV}$ α

$l_\alpha = 2, \pi_\alpha \pi_f = (-1)^{l_\alpha}$

Забранен



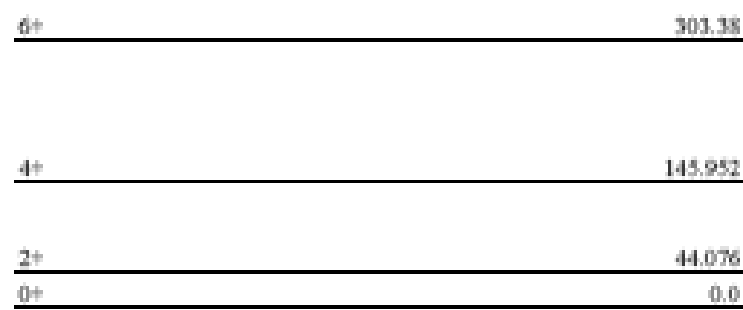
0.000012%

0.00024%

$0^+ \rightarrow 1^+, 2^-, 3^+, 4^-, 5^+ \dots$

Разрешени

$0^+ \rightarrow 0^+, 1^-, 2^+, 3^-, 4^+, 5^-, \dots$



0.0046%

0.035%

25%

74%

$l_\alpha = 6, E_\alpha = Q - E_f$ 0.07%

$l_\alpha = 4, E_\alpha = Q - E_f$ 1.5%

$l_\alpha = 2, E_\alpha = Q - E_f$ 23%

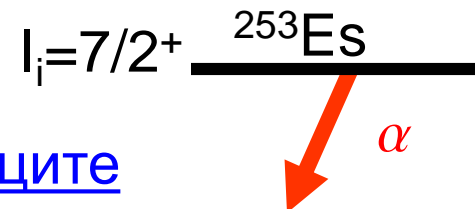
$l_\alpha = 0, E_\alpha = Q$ 76%

Ротационна ивица върху
 основното състояние

I_f

^{242}Pu

Приложение на правилата на отбор



Ъглово разпределение на α -частиците

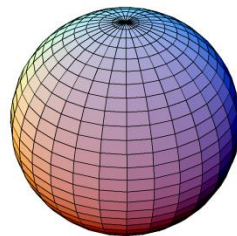
15/2⁺

13/2⁺

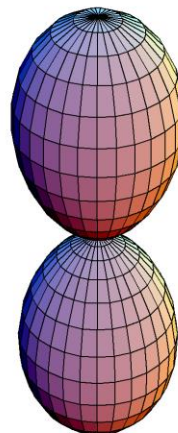
11/2⁺

9/2⁺

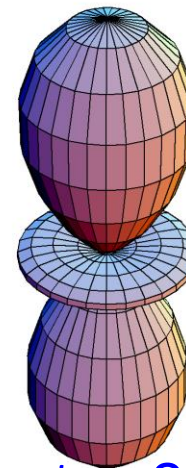
7/2⁺



$l_\alpha = 0$



$l_\alpha = 1$



$l_\alpha = 2$

2 0.88% 4 0.27% 6 0.003% 8

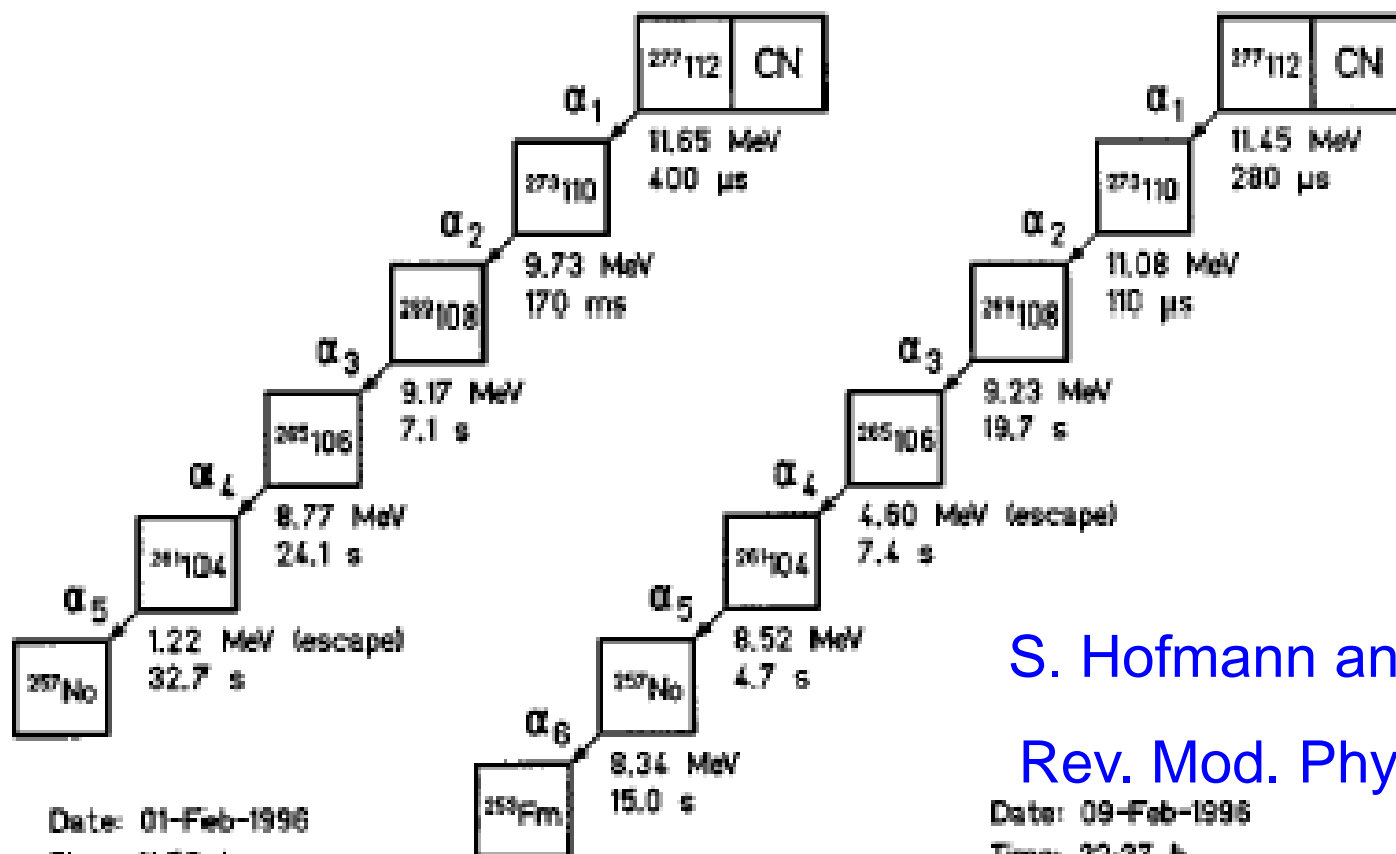
2 5.9% 4 0.33% 6 0.001% 8

0 79.6% 2 10% 4 0.13% 6 0.0002%

^{249}Bk

l_α I_α

Идентификация на свръх-тежки елементи



S. Hofmann and G. Münzenberg

Rev. Mod. Phys. 72, 733 (2000)

Date: 01-Feb-1996

Time: 11:52 h

Date: 09-Feb-1996

Time: 22:37 h