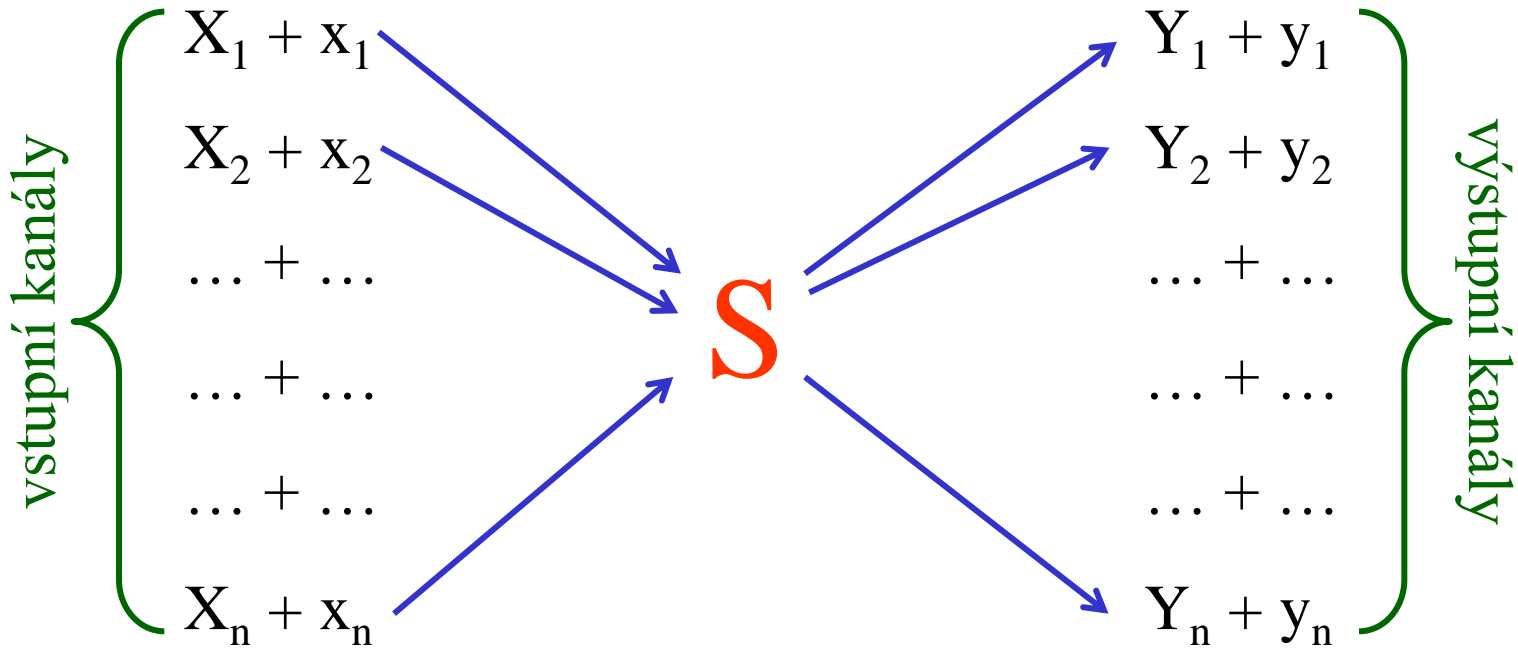
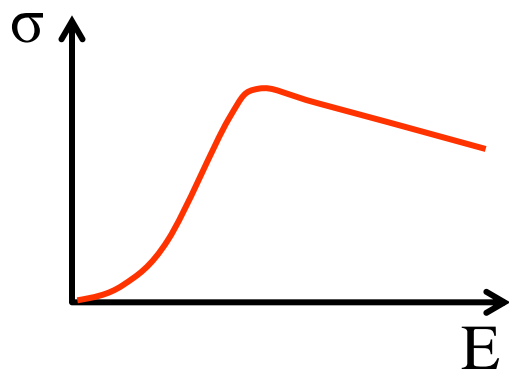


Jaderná chemie 2

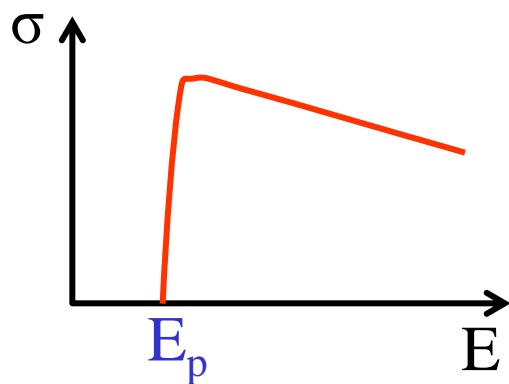
J. John



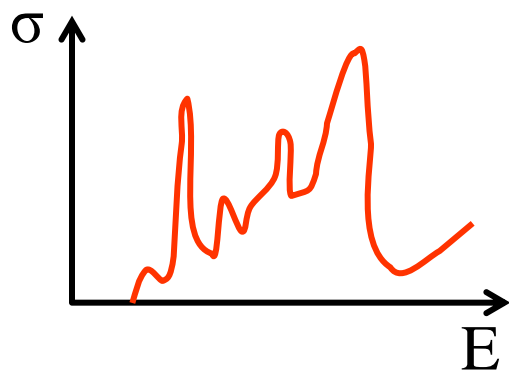
Excitační funkce – nabité částice



exoergické reakce



endoergické reakce



reakce s rezonancemi



Hodnoty σ pro reakci (n, γ)

$$\sigma = \pi \left(r + \frac{h}{2\pi\sqrt{2mE}} \right)^2$$

$$E = 0,025 \text{ eV} \rightarrow \sigma = 10^7 \text{ b}$$

$$1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$\underline{\text{Gd}} \sigma_{\text{abs}} = 4,9 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2 \text{ (49 000 b)}$$

$$^{152}\text{Gd} (0,20 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 10^{-22} \text{ cm}^2 \quad (100 \text{ b})$$

$$^{154}\text{Gd} (2,15 \%) \quad \sigma_{\text{abs}} = 2,3 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 \quad (23 \text{ b})$$

$$^{155}\text{Gd} (14,73 \%) \quad \sigma_{\text{abs}} = 6,1 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2 \quad (\underline{61 000 \text{ b}})$$

$$^{156}\text{Gd} (20,47 \%) \quad \sigma_{\text{abs}} = 8,67 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (8,67 \text{ b})$$

$$^{157}\text{Gd} (15,68 \%) \quad \sigma_{\text{abs}} = 2,54 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2 \quad (\underline{254 000 \text{ b}})$$

$$^{158}\text{Gd} (24,87 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 3,5 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (3,5 \text{ b})$$

$$^{160}\text{Gd} (21,90 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 7,58 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2 \quad (0,758 \text{ b})$$

Hodnoty σ pro reakci (n, γ)

Sm $\sigma_{\text{abs}} = 5,82 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2$ (5 820 b)

^{144}Sm (3,09 %) $\sigma_{\text{akt}} = 5,82 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2$ (5 820 b)

^{149}Sm (13,83 %) $\sigma_{\text{abs}} = 4,1 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ (41 000 b)

^{150}Sm (7,44 %) $\sigma_{\text{akt}} = 1,02 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (102 b)

^{152}Sm (26,72 %) $\sigma_{\text{akt}} = 2,1 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (210 b)

^{154}Sm (22,71 %) $\sigma_{\text{akt}} = 5,5 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ (5,5 b)

Hodnoty σ pro reakci (n, γ)

Cd $\sigma_{\text{at}} = 5,45 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2$ (5 450 b)

^{106}Cd (1,215 %)

$$\sigma_{\text{akt}} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

^{108}Cd (0,875 %)

$$\sigma_{\text{akt}} = 2 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

^{110}Cd (12,39 %)

$$\sigma_{\text{akt}} = 1,1 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 \quad \sigma_{\text{abs}} = 10^{-25} \text{ cm}^2$$

^{111}Cd (12,75 %)

$$\sigma_{\text{abs}} = 2,4 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2$$

^{112}Cd (24,07 %)

$$\sigma_{\text{akt}} = 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2 \quad \sigma_{\text{abs}} = 2,2 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

^{113}Cd (12,26 %)

$$\sigma_{\text{abs}} = 2 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2 \quad \underline{\mathbf{20\,000\,b}}$$

^{114}Cd (28,86 %)

$$\sigma_{\text{akt}} = 1,4 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2 \quad (^{115}\text{Cd}; T = 49 \text{ d})$$
$$3 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2 \quad (^{115\text{m}}\text{Cd}; T = 53,5 \text{ h})$$

^{116}Cd (7,58 %)

$$\sigma_{\text{akt}} = 2,7 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2 \quad (^{117}\text{Cd}; T = 3,1 \text{ h})$$
$$5 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2 \quad (^{117\text{m}}\text{Cd}; T = 2,5 \text{ h})$$

Hodnoty σ pro reakci (n, γ)

$$\underline{\text{In}} \sigma_{\text{at}} = 1,94 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2 (194 \text{ b})$$

$$^{113}\text{In} (4,28 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 8,1 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (^{114}\text{In}, T = 50 \text{ d})$$
$$3 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (^{114\text{m}}\text{In}, T = 72 \text{ s})$$

$$^{115}\text{In} (95,72 \%) \quad \sigma_{\text{abs}} = 8,1 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 \quad (^{116\text{m}2}\text{In}, T = 2,2 \text{ s})$$
$$8,1 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 \quad (^{116\text{m}1}\text{In}, T = 54 \text{ m})$$
$$4,2 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 \quad (^{116}\text{In}, T = 14 \text{ s})$$

$$\underline{\text{Eu}} \sigma_{\text{akt}} = 4,4 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2 (4\,400 \text{ b})$$

$$^{151}\text{Eu} (47,82 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 3,8 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \text{ pro vznik } ^{152\text{m}2}\text{Eu} (T = 96 \text{ m})$$
$$3,1 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2 \text{ pro vznik } ^{152\text{m}1}\text{Eu} (T = 9,3 \text{ h})$$
$$5,7 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2 \text{ pro vznik } ^{152}\text{Eu} (T = 12,4 \text{ r})$$

$$^{153}\text{Eu} (52,18 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 3,9 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$$

Hodnoty σ pro reakci (n, γ)

Er $\sigma_{\text{abs}} = 1,6 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (160 b)

$$^{162}\text{Er} (0,136 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 2 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (2 \text{ b})$$

$$^{164}\text{Er} (1,56 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 1,65 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (1,65 \text{ b})$$

$$^{166}\text{Er} (33,41 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 10^{-23} \text{ cm}^2 \quad (10 \text{ b})$$
$$\sigma_{\text{abs}} = 3,5 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 \quad (35 \text{ b})$$

$$^{167}\text{Er} (22,94 \%) \quad \sigma_{\text{abs}} = 6,5 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2 \quad (650 \text{ b})$$

$$^{168}\text{Er} (27,07 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 2,03 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (2,03 \text{ b})$$

$$^{170}\text{Er} (14,88 \%) \quad \sigma_{\text{akt}} = 9 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (9 \text{ b})$$

Hodnoty σ pro reakci (n, γ) pro těžké prvky

^{233}U (T = $1,6 \cdot 10^5$ r) $4,86 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2$ (48,6 b)

^{234}U (T = $2,5 \cdot 10^5$ r) $9,5 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2$ (95 b)

^{235}U (T = $7,1 \cdot 10^8$ r) $1,07 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (107 b)

^{238}U (T = $4,5 \cdot 10^9$ r) $2,73 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ (2,73 b)

^{237}Np (T = $2,14 \cdot 10^6$ r) $1,7 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (170 b)

^{239}Np (T = 2,53 d) $3,5 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2$ (35 b)

$2,5 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2$ (25 b)

^{239}Pu (T = $2,44 \cdot 10^4$ r) $2,65 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (265 b)

^{240}Pu (T = $6,6 \cdot 10^3$ r) $2,81 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (281 b)

^{241}Pu (T = 14 r) $3,81 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (381 b)

Hodnoty σ pro reakci (n, γ) pro těžké prvky

^{241}Am (T = 433 r) $6,2 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (620 b)

^{242}Am (T = 152 r) $5,5 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2$ (5 500 b)

^{243}Am (T = $7,95 \cdot 10^3$ r) $6,5 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2$ (65 b)

^{243}Cm (T = $9,32 \cdot 10^3$ r) $2 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (200 b)

^{244}Cm (T = 18 r) $2,5 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2$ (25 b)

^{245}Cm (T = $9,32 \cdot 10^3$ r) $2,0 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$ (200 b)

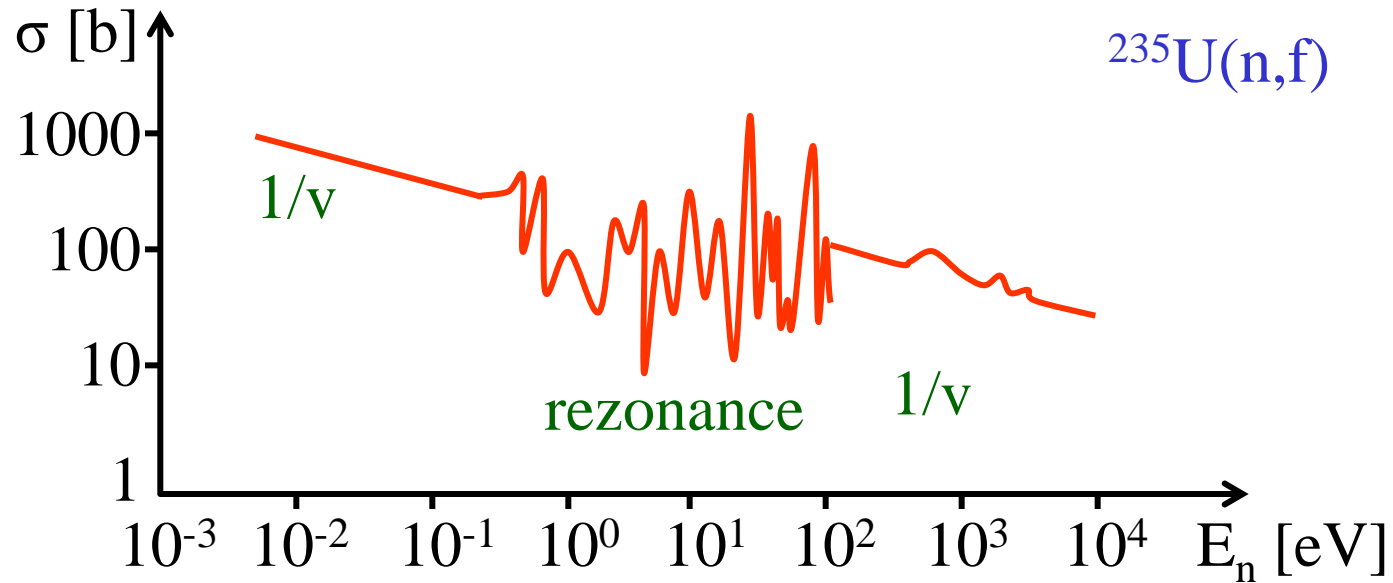
^{249}Bk (T = 314 d) $1,1 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2$ (1 100 b)

Hodnoty σ pro reakci (n,x)

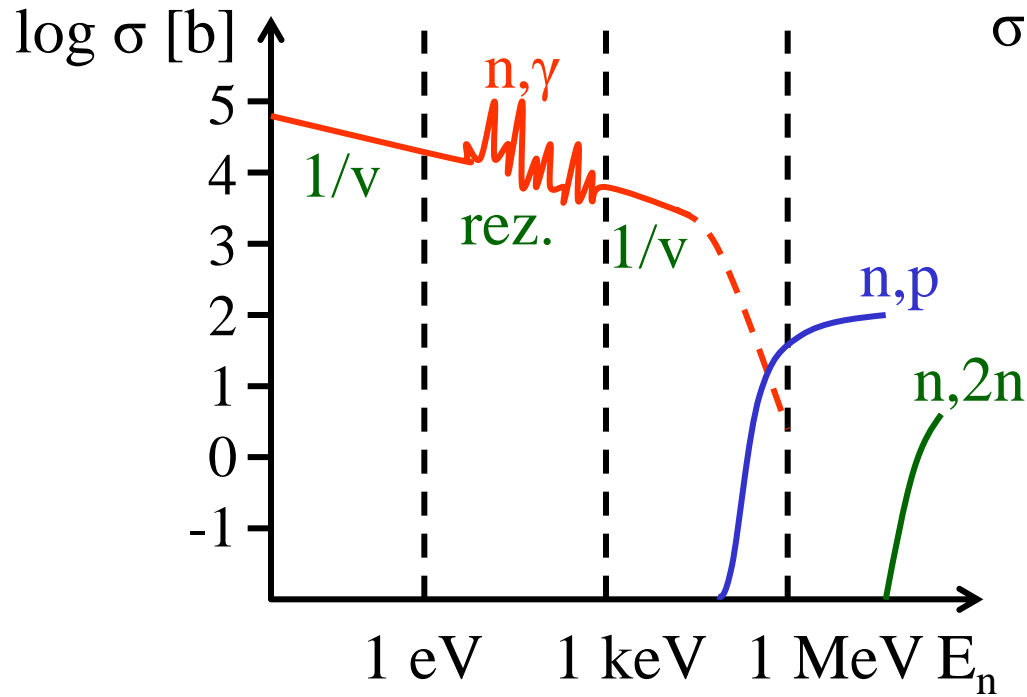
${}^3\text{He}(\text{n,p})\text{T}$	$5,3 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2$	(5 300 b)
${}^7\text{Be}(\text{n,p}) {}^7\text{Li}$	$5,4 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$	(54 000 b)
<hr/>		
${}^6\text{Li}(\text{n},\alpha)\text{T}$	$9,5 \cdot 10^{-22} \text{ cm}^2$	(950 b)
${}^{10}\text{B}(\text{n},\alpha){}^7\text{Li}$	$3,8 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2$	(3 800 b)

Excitační funkce - neutrony

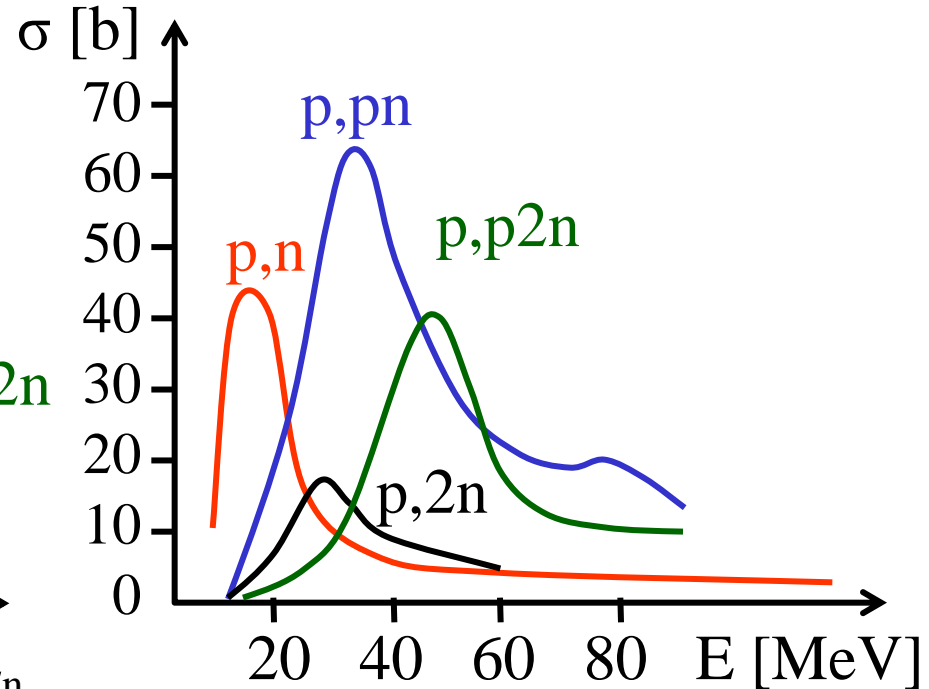
$$\sigma_a = k \frac{1}{v_n} = k' \frac{1}{\sqrt{E_n}} \quad (\text{pro } E_n < n \cdot 10^0 \text{ eV})$$



Simultanní reakce

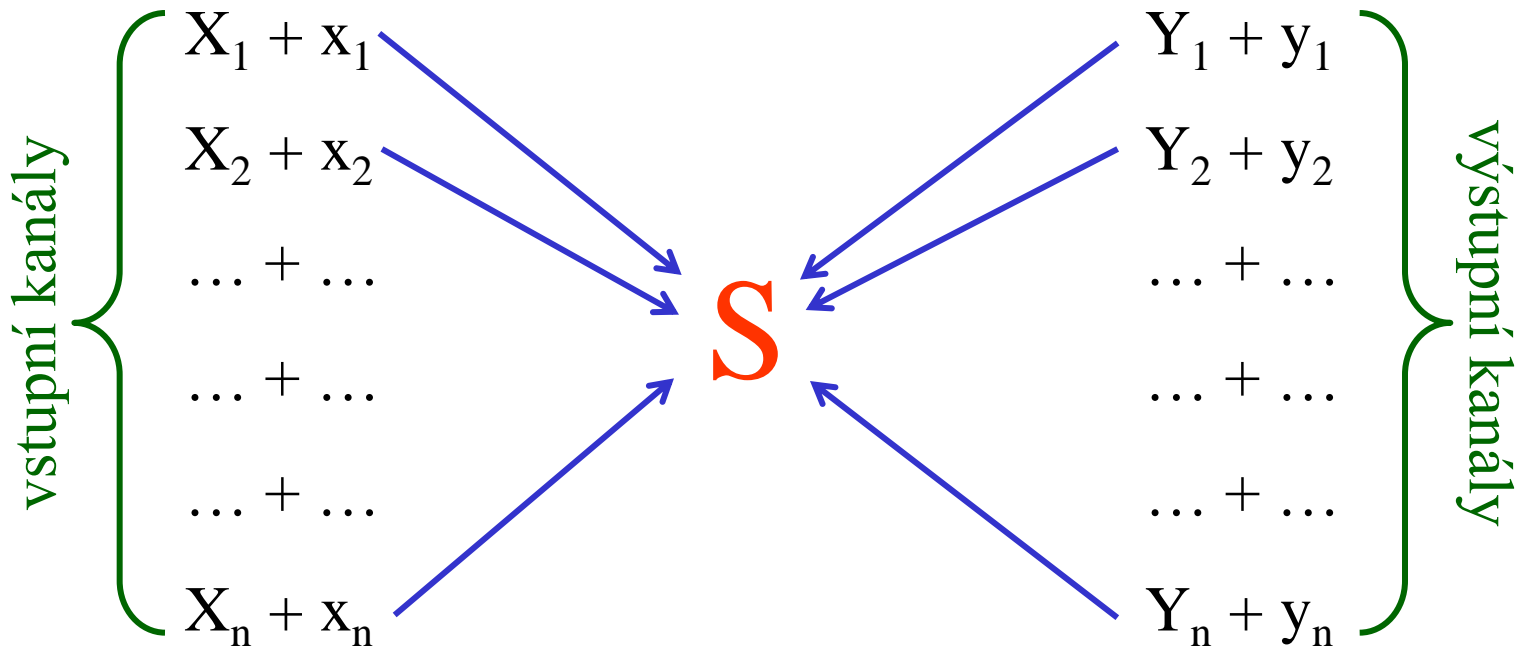
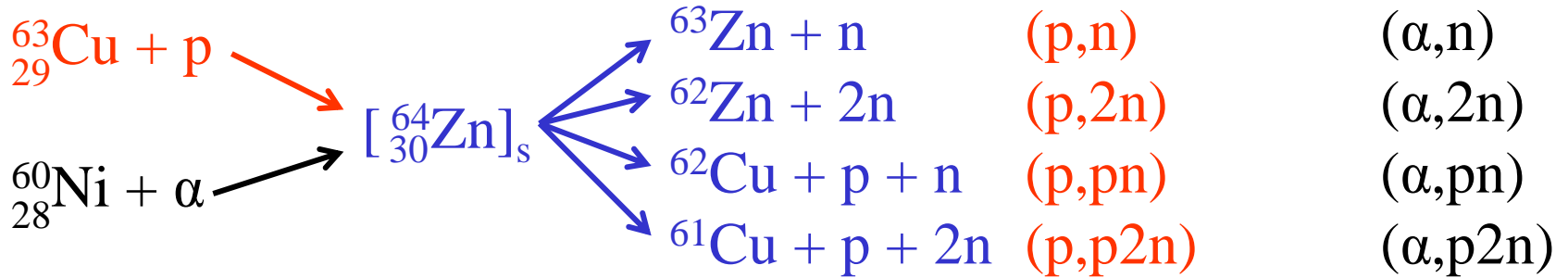


neutrony

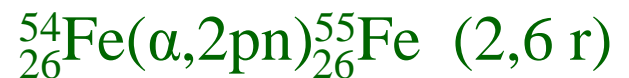
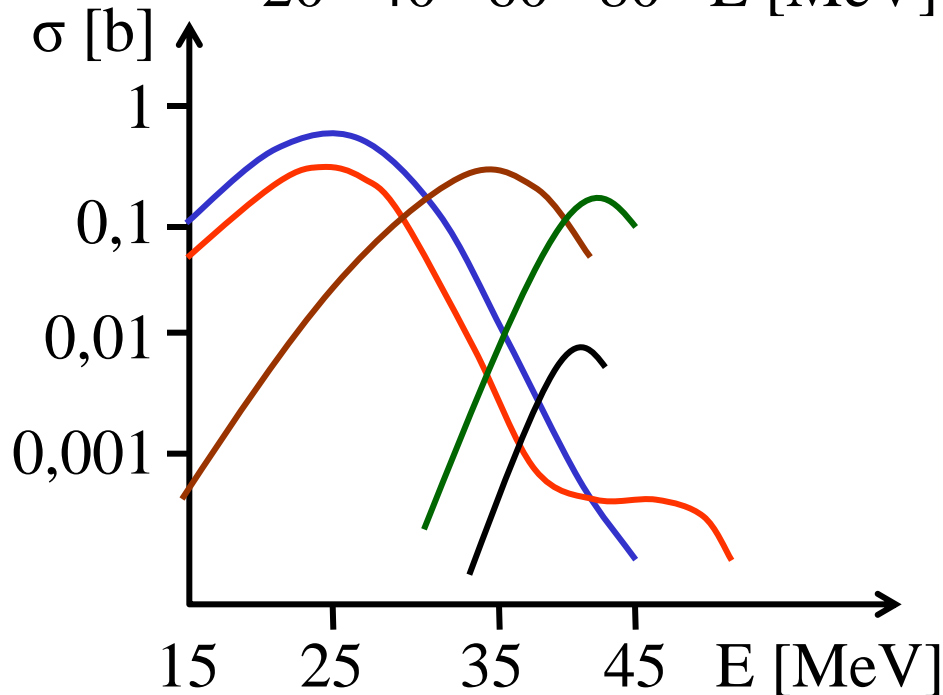
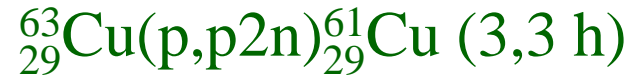
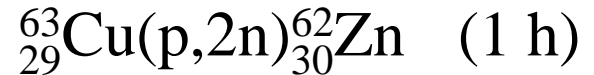
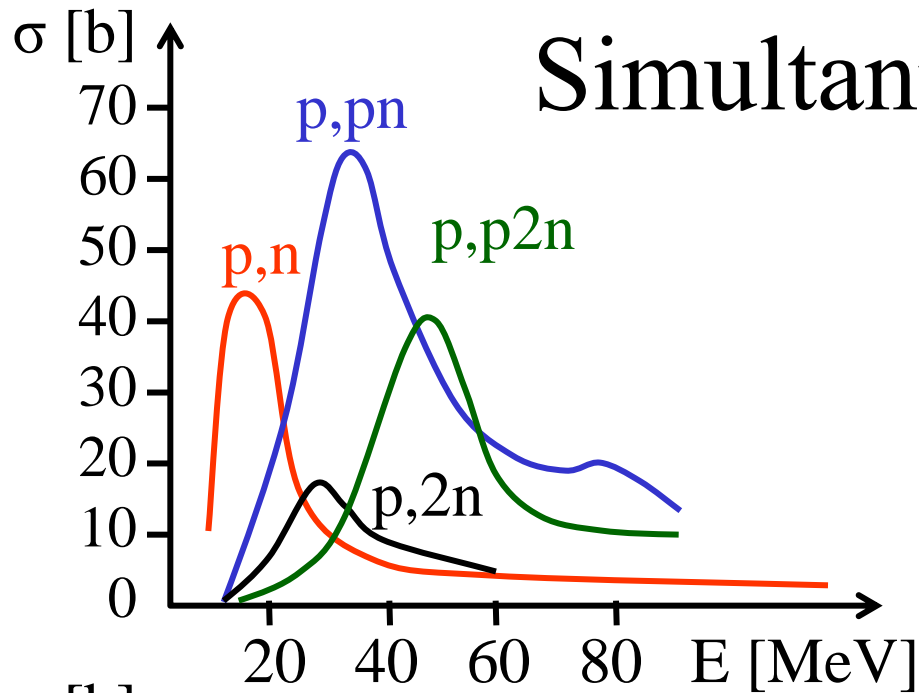


$^{63}\text{Cu}+p$

Simultanní reakce

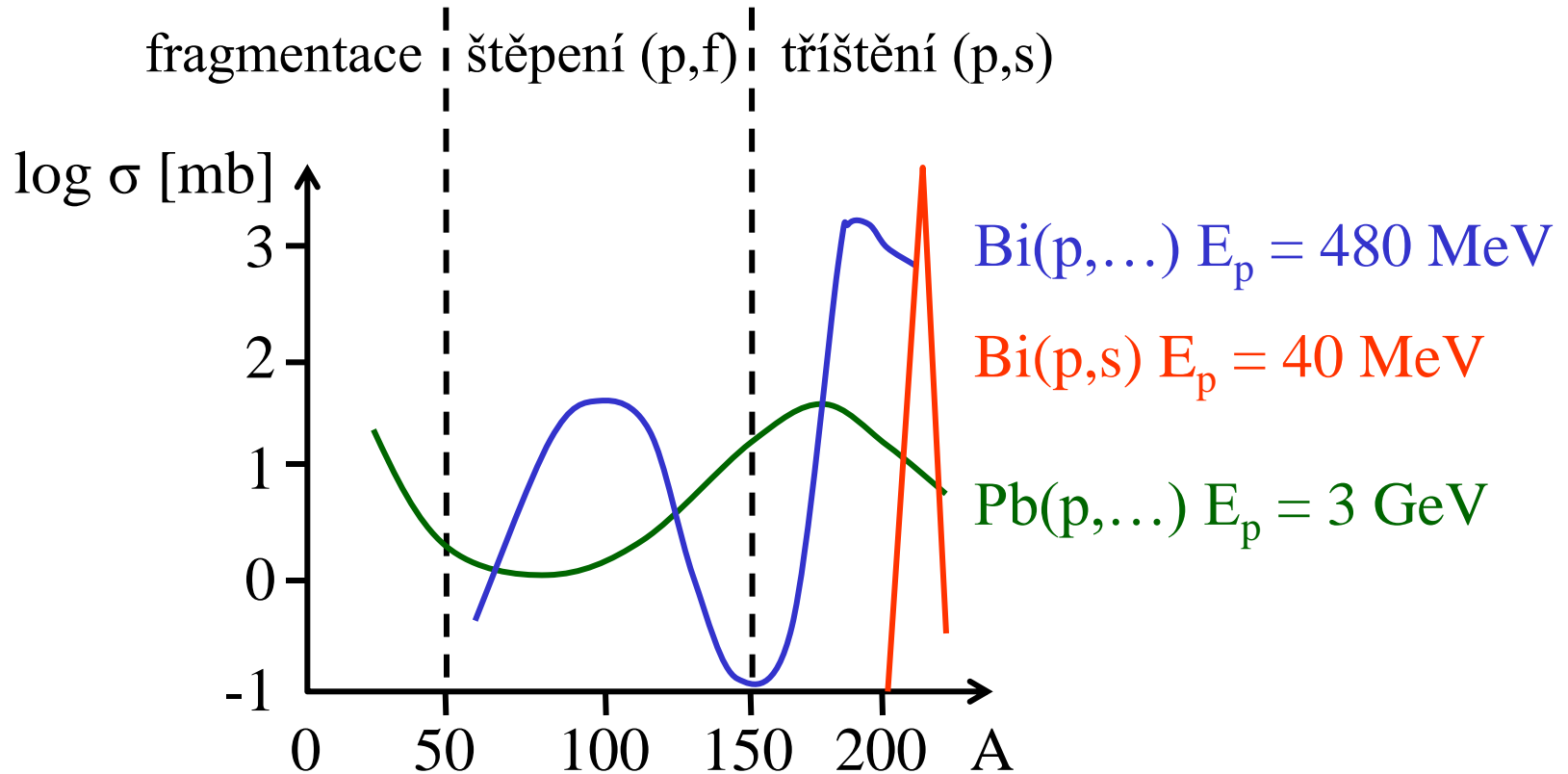


Simultanní reakce



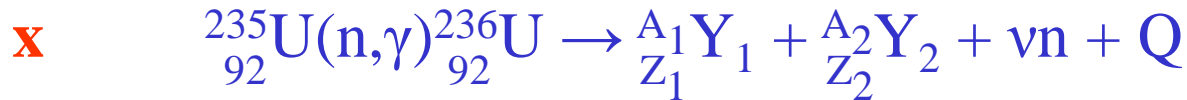
Simultanní reakce

Vysokoenergetické částice



Štěpení

1939 Hahn + Strassman (+ Maierová)



Typy štěpných reakcí:

- 1) Tepelnými neutrony ${}^{235}\text{U}$, ${}^{233}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$, ... TRU
- 2) Rychlými neutrony ${}^{238}\text{U}$ ($E_n > 1 \text{ MeV}$), ${}^{232}\text{Th}$, ...
- 3) Nabitými částicemi stř. energii α , p, d, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, $E > 10 \text{ MeV}$
- 4) Nabitými částicemi vysokých energií $n \cdot 100 - n \cdot 1000 \text{ MeV}$
(lehká jádra)
- 5) Fotoštěpení
- 6) Spontánní štěpení
- 7) Multipartice jádra tri-, quadri-partice

Elementární teorie štěpení

Kapkový model – Weizsäckerova formule:

$$m(Z, A) = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n + a_V \cdot A + a_p A^{2/3} + a_N \cdot \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \\ + a_c \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3} + a_K \cdot A^{-3/4}$$

$$E_V (MeV) = 14,0 \cdot A - 13,0 \cdot A^{2/3} - 0,584 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 19,3 \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{33,5}{A^{3/4}} \cdot \delta$$

Elementární teorie štěpení

Bohr, Wheeler, Frenkel

γ ... povrchové napětí

$$1) E_{\text{povrch}} = 4\pi r^2 \gamma$$

$$3) E_V \sim A$$

$$2) E_C = \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{r}$$

$$Z_1 = Z_2 = \frac{Z}{2} \quad A_1 = A_2 = \frac{A}{2} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 = 2 \cdot \frac{4}{3} \pi r_1^3 \quad \Rightarrow \quad r_1^3 = \frac{r^3}{2} \quad ; \quad r_1 = \frac{r}{2^{1/3}}$$

$$E_{\text{poč.}} = 4\pi r^2 \gamma + \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{r}$$

$$E_{\text{kon.}} = 2 \left(4\pi \frac{r^2}{2^{2/3}} \gamma + \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{4r} \cdot 2^{1/3} \right)$$

$$\Delta E = E_{\text{poč.}} - E_{\text{kon.}} = \underbrace{4\pi r^2 \gamma (1 - 2^{1/3})}_{< 0} + \underbrace{\frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{r} (1 - 2^{-2/3})}_{> 0}$$

1,259 0,633

Elementární teorie štěpení

$$\text{Štěpení pro } \Delta E \geq 0 \Rightarrow 4\pi r^2 \gamma (1 - 2^{1/3}) \leq \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{r} (2^{-2/3} - 1)$$

$$\frac{E_C}{E_{\text{povrch}}} = \frac{\frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{r}}{4\pi r^2 \gamma} \geq \frac{1 - 2^{1/3}}{2^{-2/3} - 1} = 0,7$$

$$\frac{E_C}{E_{\text{povrch}}} = \frac{\frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{r_0 A^{1/3}}}{4\pi r_0^2 A^{2/3} \gamma} = \frac{3}{20} \frac{e^2}{\pi r_0^3 \gamma} \cdot \left(\frac{Z^2}{A} \right)$$

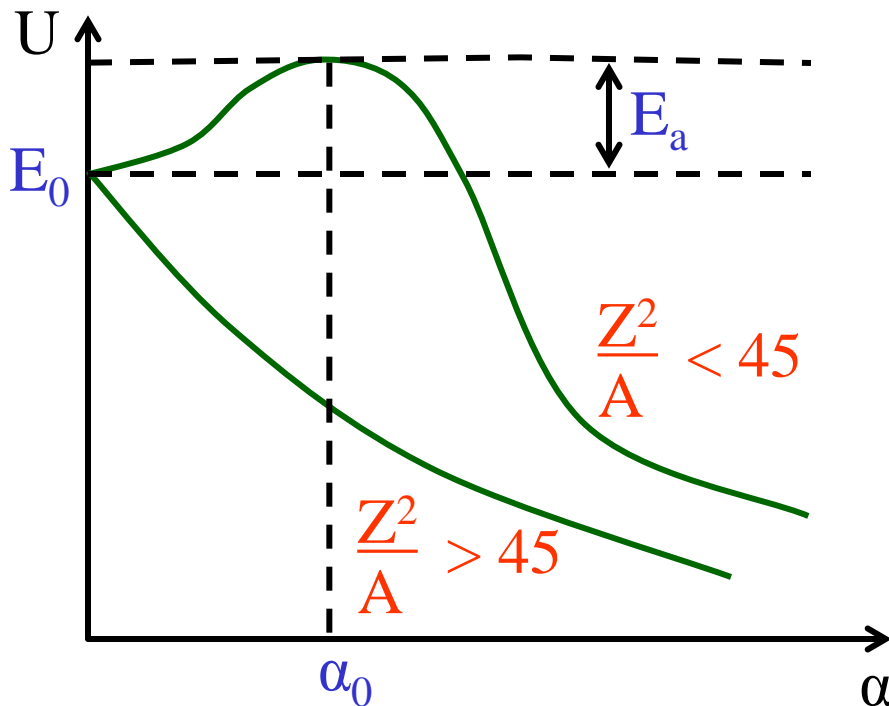
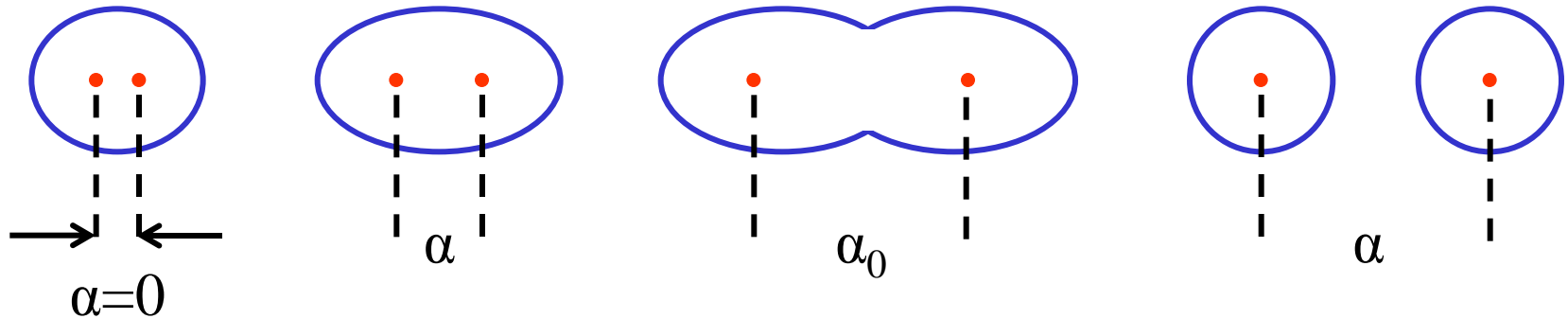
parametr štěpení

$$\left(\frac{Z^2}{A} \right)_{\text{max}} \approx 45 \Rightarrow Z_{\text{max}} \approx 110 - 125 !!!$$

$$\frac{Z^2}{A} < 45 \quad - E_a \quad - \text{aktivační energie}$$

Elementární teorie štěpení

Parametr deformace α



α_0 – kritická deformace

Elementární teorie štěpení

Aktivační energie

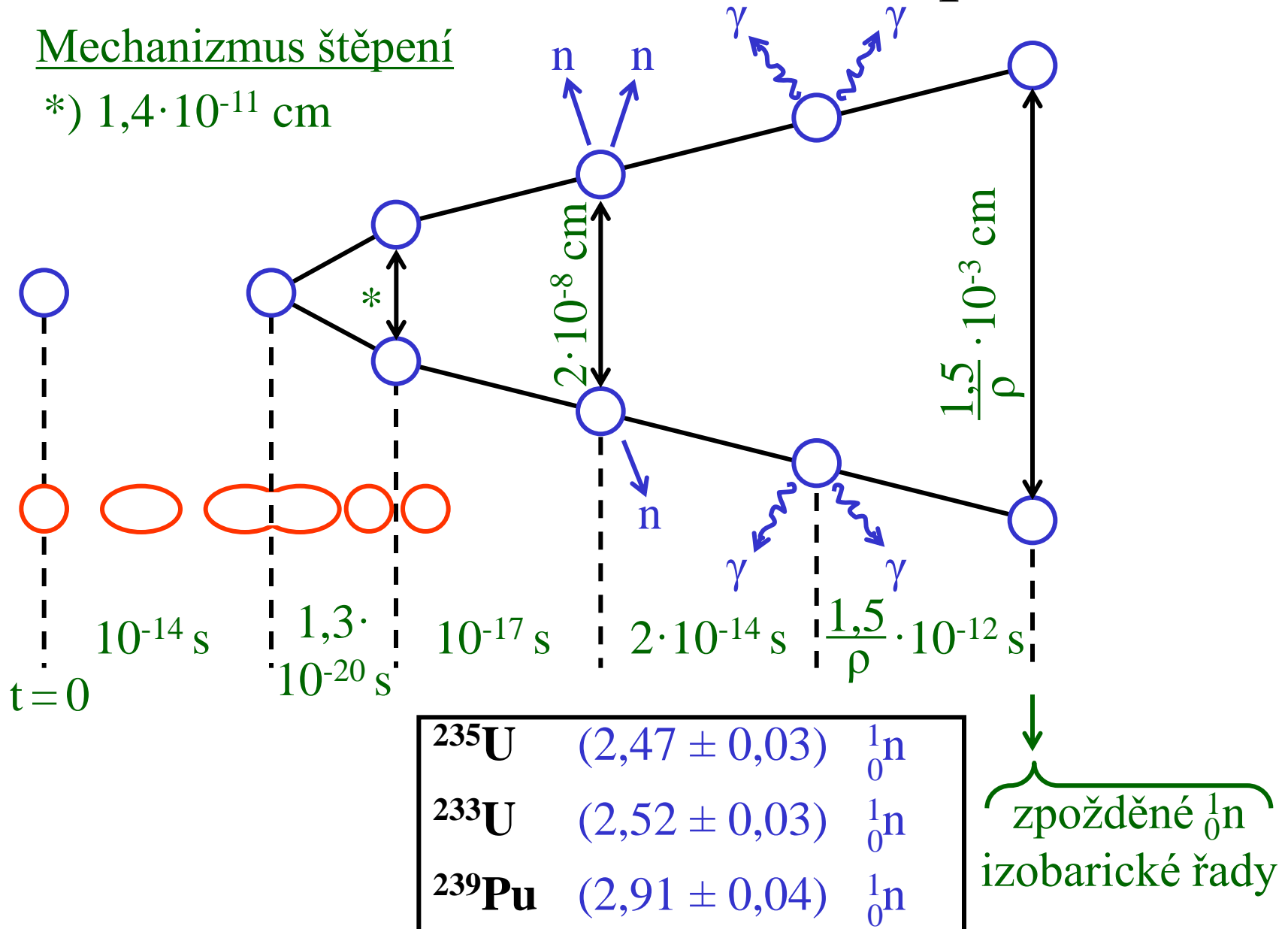
$$E_a = A^{2/3} \left[10,2 \left(1 - 0,022 \frac{Z^2}{A} \right)^3 - 4,6 \left(1 - 0,0022 \frac{Z^2}{A} \right)^4 \right]$$

Z	Nuklid	E_a [MeV]	E_{vaz} [MeV]	
74	^{183}W	14,6		
82	^{207}Pb	10,6		
88	^{226}Ra	8,8		
90	^{232}Th	7,6	~ 5,4	n_r
91	^{231}Pa	6,2		
92	^{238}U	6,4	~ 5,4	n_r
92	^{235}U	6,1	} ~ 6,4	n_t
92	^{233}U	5,7		
94	^{239}Pu	4,9		

Elementární teorie štěpení

Mechanismus štěpení

*) $1,4 \cdot 10^{-11}$ cm



Štěpení ^{235}U tepelnými neutrony

0,72 % ^{235}U v U

$\sigma_c = 98,38 \text{ b}$

$\sigma_f = 583,54 \text{ b}$

($^{236}\text{U} - \alpha$, SF, $T_{1/2} = 2,34 \cdot 10^7 \text{ r}$)

Okamžité neutrony

Počet $\frac{1}{0}\text{n}$

Pravděpodobnost

0	1	2	3	4	5
0,03	0,16	0,34	0,30	0,13	0,04

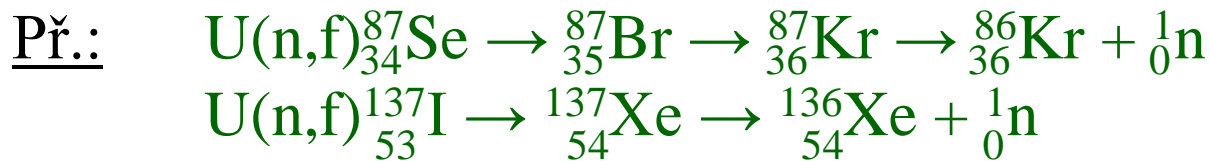
Počet $\frac{1}{0}\text{n} = 2,47 \pm 0,03$

Sekundární procesy: Izobarické řady

až 7 kroků ke stabilitě

Štěpení ^{235}U tepelnými neutrony

Zpožděné neutrony



0,0158 ${}^1_0\text{n}$ / štěpení

$T_{1/2}$	0,2 s	0,5 s	2 s	6 s	22 s	55 s
nuklid	celá řada		${}^{90}\text{Br}$	${}^{89}\text{Br}$	${}^{137}\text{I}$	${}^{87}\text{Br}$
			${}^{85}\text{As}$	${}^{138}\text{I}$	${}^{88}\text{Br}$	
			${}^{94}\text{Rb}$			
			...			

Štěpení ^{235}U tepelnými neutrony

Energetika

Primární proces

trosky	162 MeV	(doběh 1,5-2 cm; $Z \approx + 20$)
^1_0n	6 MeV	
γ	6 MeV	

Sekundární proces

β	5 MeV	
γ	5 MeV	
^1_0n	0,25-0,6 MeV	
ν	11 MeV	

- kalorimetr naměří 180 MeV vs. výpočet $235 \cdot 0,9 \approx 211$ MeV

rozdíl by způsobila γ , ale zdaleka ne vše...

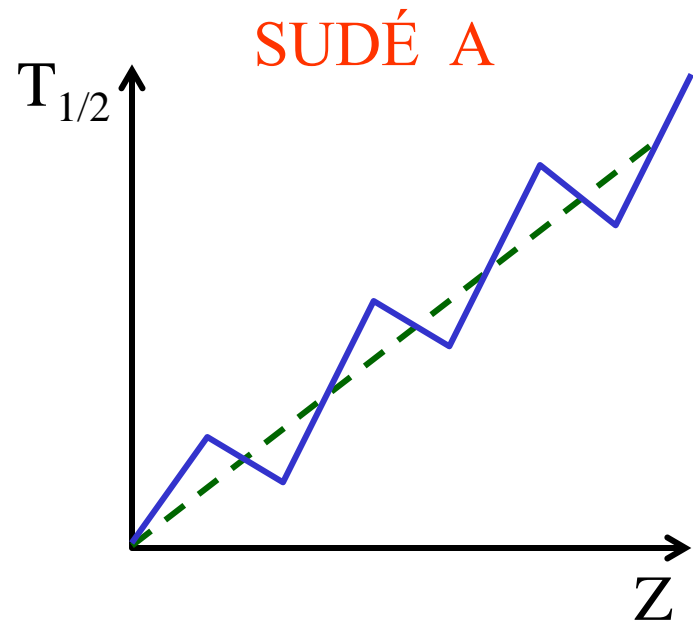
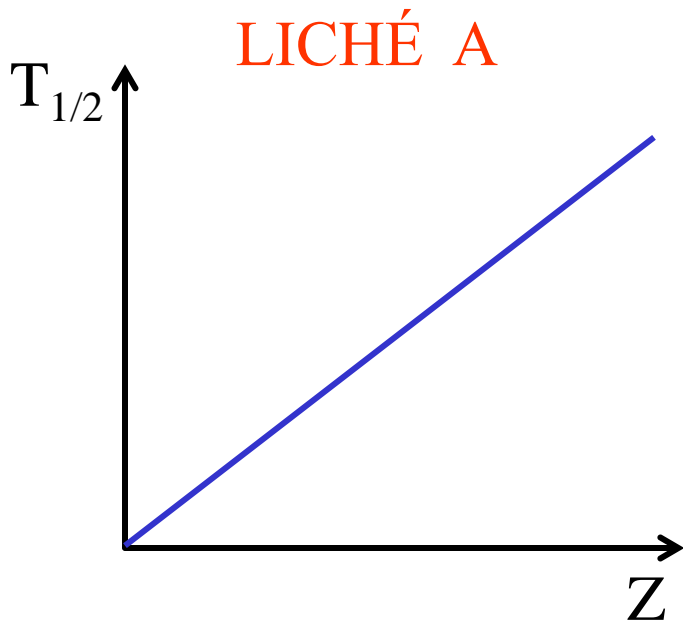
v odnesou podstatnou část energie !!!

Štěpení ^{235}U tepelnými neutrony

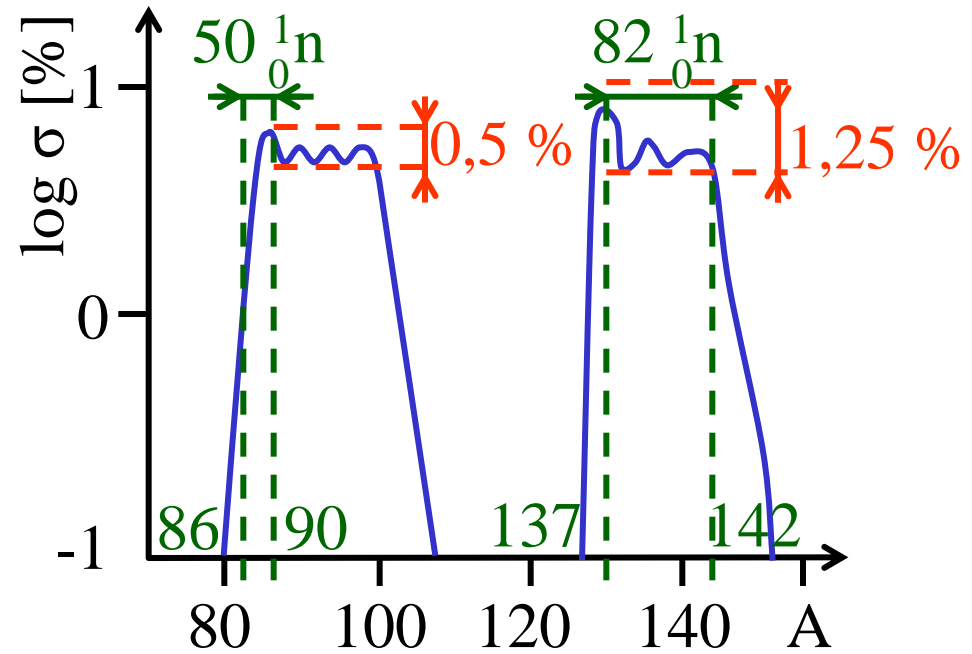
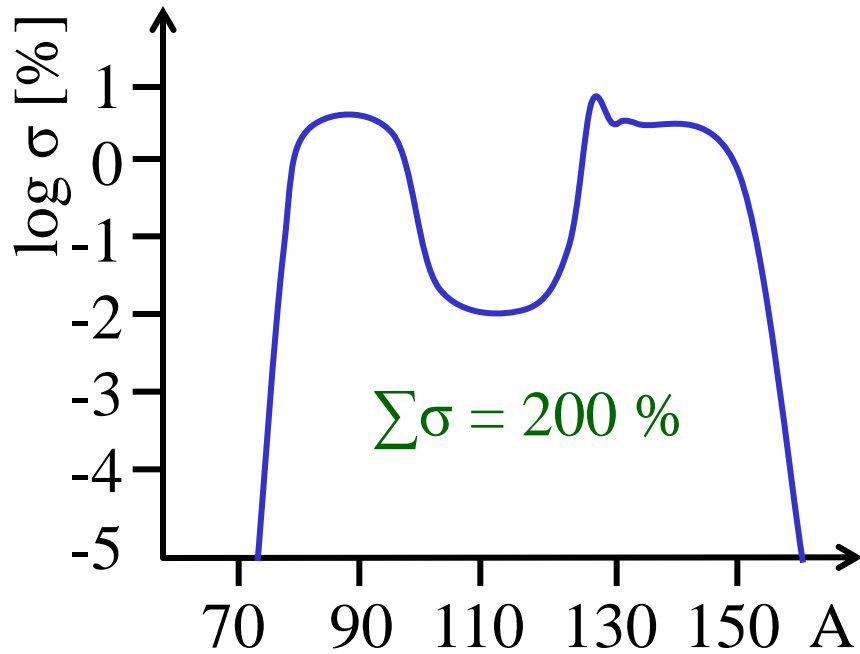
Přeměnové řady

$Z \in \langle 30 ; 65 \rangle$ $A \in \langle 72 ; 161 \rangle$
 $\langle \text{Zn} ; \text{Tb} \rangle$

Štěpný výtěžek: Nezávislý
Kumulativní
Řady



Štěpení ^{235}U tepelnými neutrony



A 85-105 Z 35-45 (Br-Rh)

A 130-150 Z 51-62 (Sb-Sm)

Nuklid ($T_{1/2}$) σ [%]

Nuklid ($T_{1/2}$) σ [%]

^{95}Zr (66 d) – ^{95}Nb (35 d) 6,27

^{140}Ba (13 d) – ^{140}La (40 h) 6,3

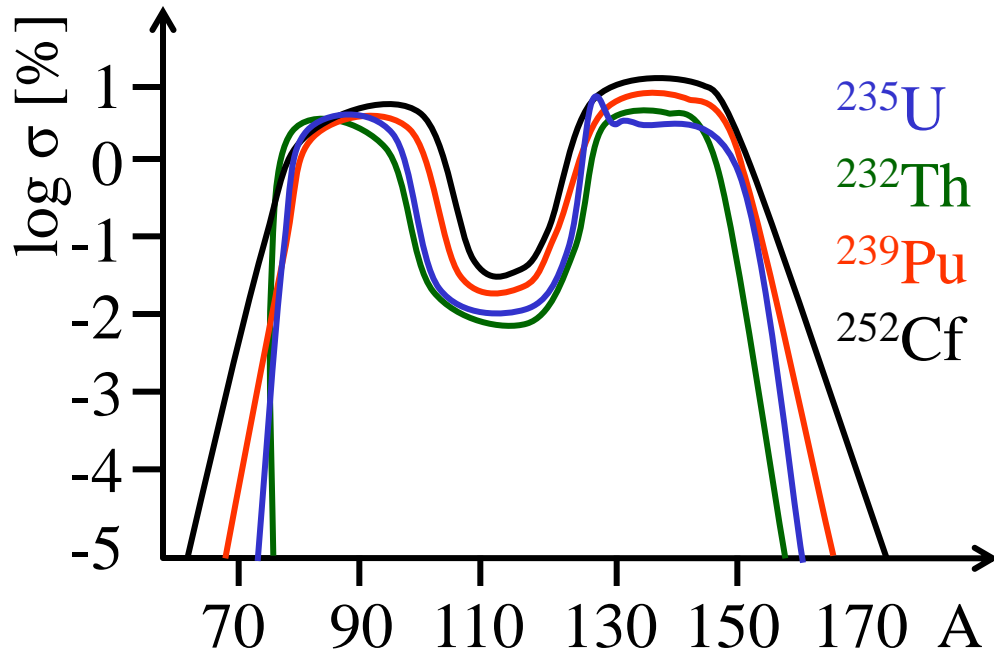
^{99}Mo (67 h) – $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (6 h) 6,16

^{137}Cs (30 r) – $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (2 min) 6,18

^{90}Sr (28 r) – ^{90}Y (64 h) 5,9

^{144}Ce (284 d) – ^{144}Pr (14 min) 6,0

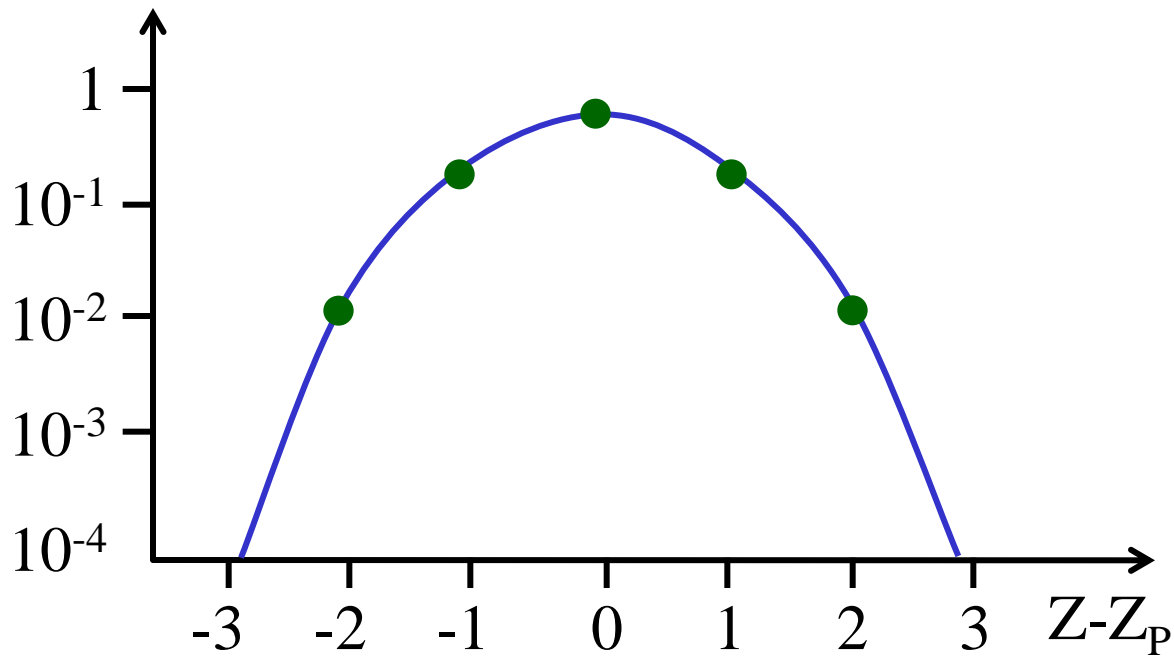
Štěpení tepelnými neutrony



Nuklid	Složené jádro	Lehká A_{\max}	Těžká A_{\max}
^{232}Th	^{233}Th	92	139
^{233}U	^{234}U	94,5	137
^{235}U	^{236}U	95	138
^{238}U	^{239}U	96	140
^{239}Pu	^{240}Pu	99	139
^{245}Cm	^{246}Cm	103	136
^{251}Cf	^{252}Cf	108	139

(138 ± 2)

Štěpení



$$Z_P \sim 50 \%$$

$$Z_{P\pm 1} \sim 23 \%$$

$$Z_{P\pm 2} \sim 2 \%$$

$$Z_{A'} - Z_{P'} = Z_A - Z_P \quad - \text{předpoklad: stejná délka řad}$$

$$\text{Platí: } Z_F = Z_P + Z_{P'}$$

$$A + A' = A + 1 - v$$

$$\Rightarrow Z_P = Z_A - Z_{A'} + Z_{P'}$$

$$Z_P = Z_A - Z_{A'} + Z_F - Z_P$$

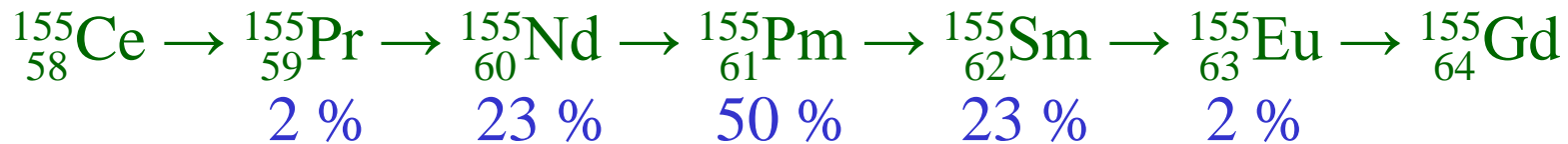
Štěpení

$$Z_P = \frac{Z_F - Z_{A'} + Z_A}{2}$$

$$Z_P - Z_A = \frac{Z_F - Z_{A'} + Z_A - 2Z_A}{2} = -\frac{1}{2}(Z_A + Z_{A'} - Z_F)$$

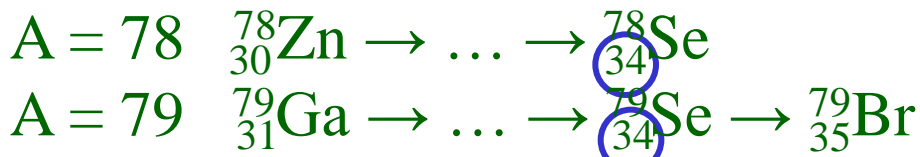
$$Z_P = Z_A - \frac{1}{2}(Z_A + Z_{A'} - Z_F)$$

Př.: $A = 155$ $Z_A = 64$

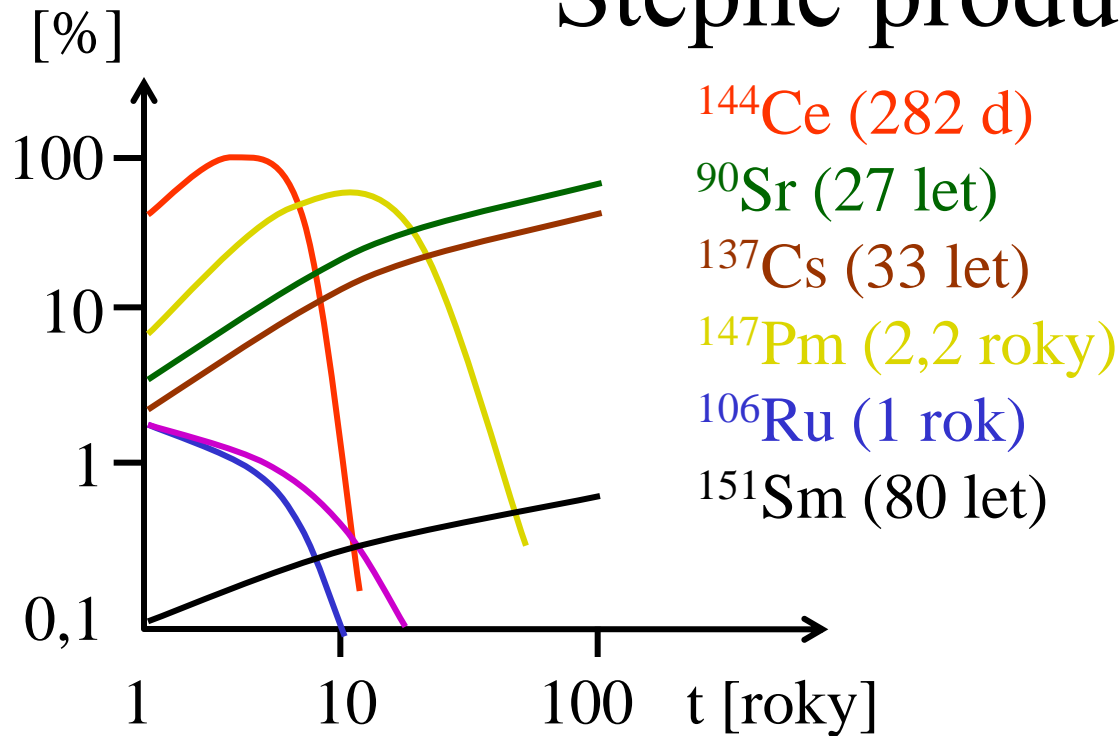


$$Z_P = 64 - \frac{1}{2}(64 + Z_{\underbrace{235+1-2,5-155}_{A' = 78,5 \rightarrow Z' = 34}} - 92)$$

$$Z_P = 64 - \frac{1}{2}(64 + 34 - 92) = \underline{\underline{61}} \longrightarrow {}_{61}^{155}\text{Pm}$$



Štěpné produkty



Po 1 roce: $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$

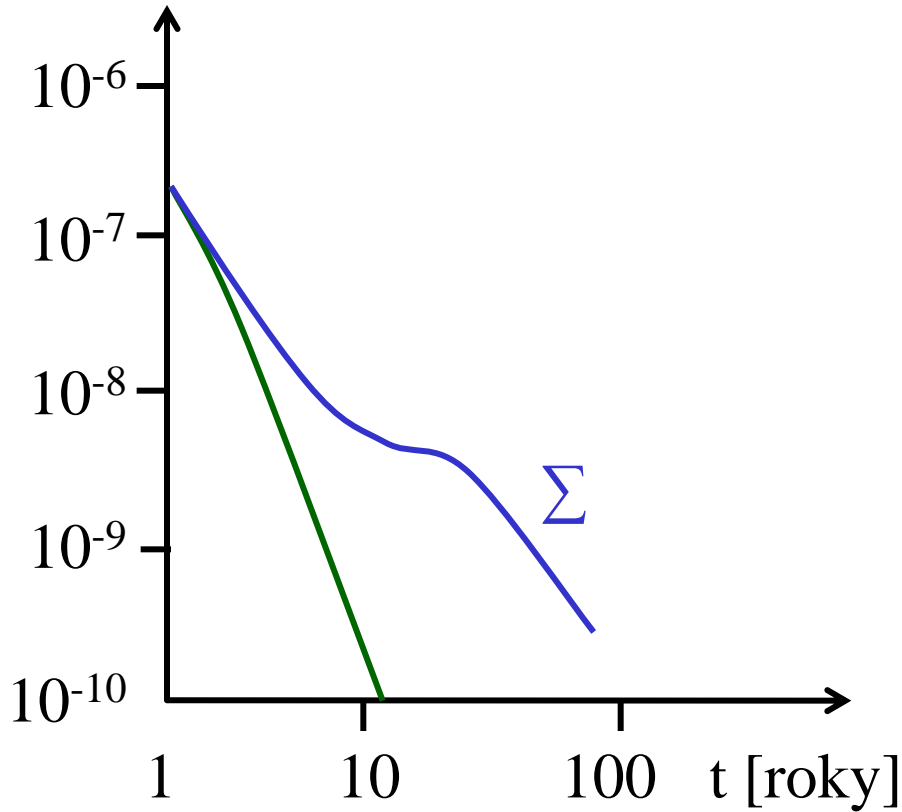
3 letech: $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}; ^{147}\text{Pm}; ^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}; ^{137}\text{Cs}$

6 letech: $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}; ^{137}\text{Cs}; ^{147}\text{Pm}$

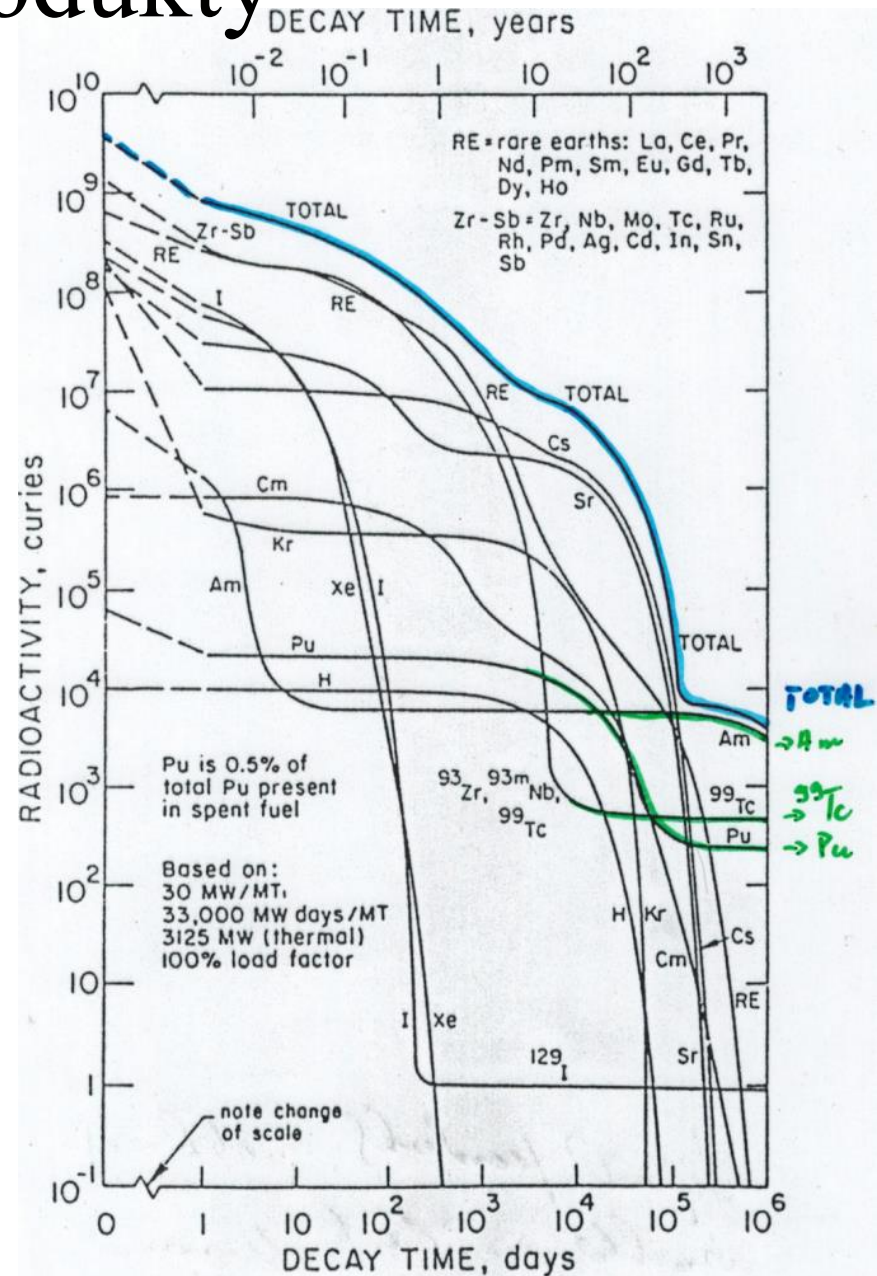
>10 let: $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}; ^{137}\text{Cs}$

Štěpné produkty

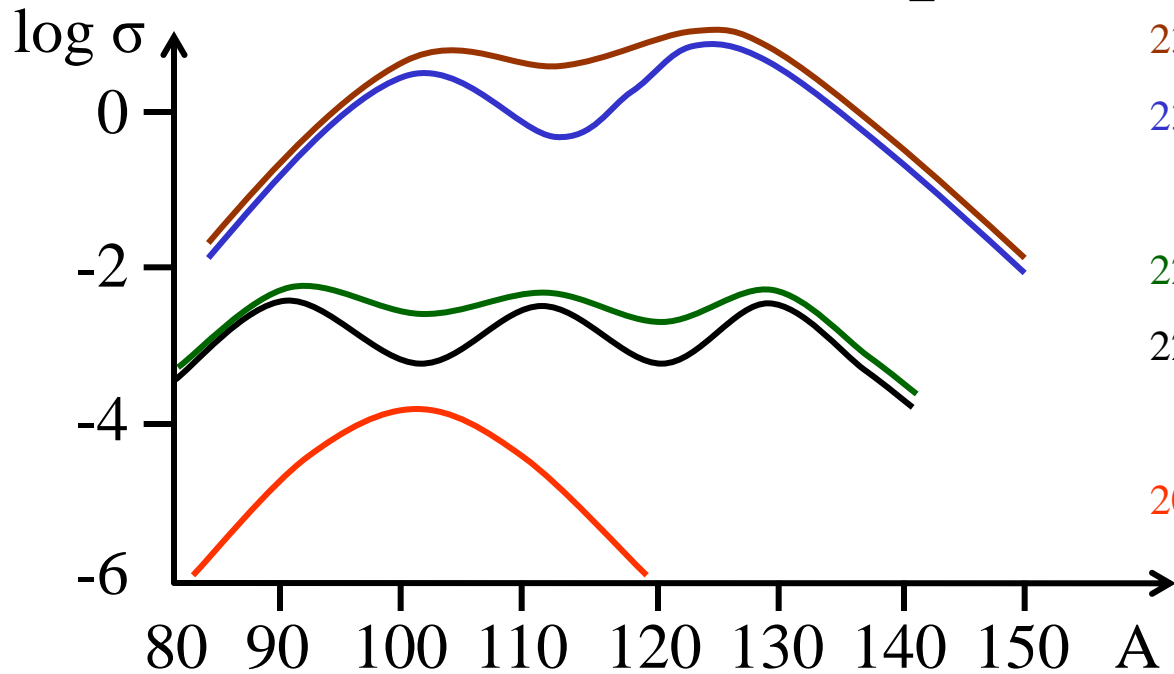
Š.A. [$s^{-1}/100$]



bez ^{137}Cs a ^{90}Sr



Štěpení



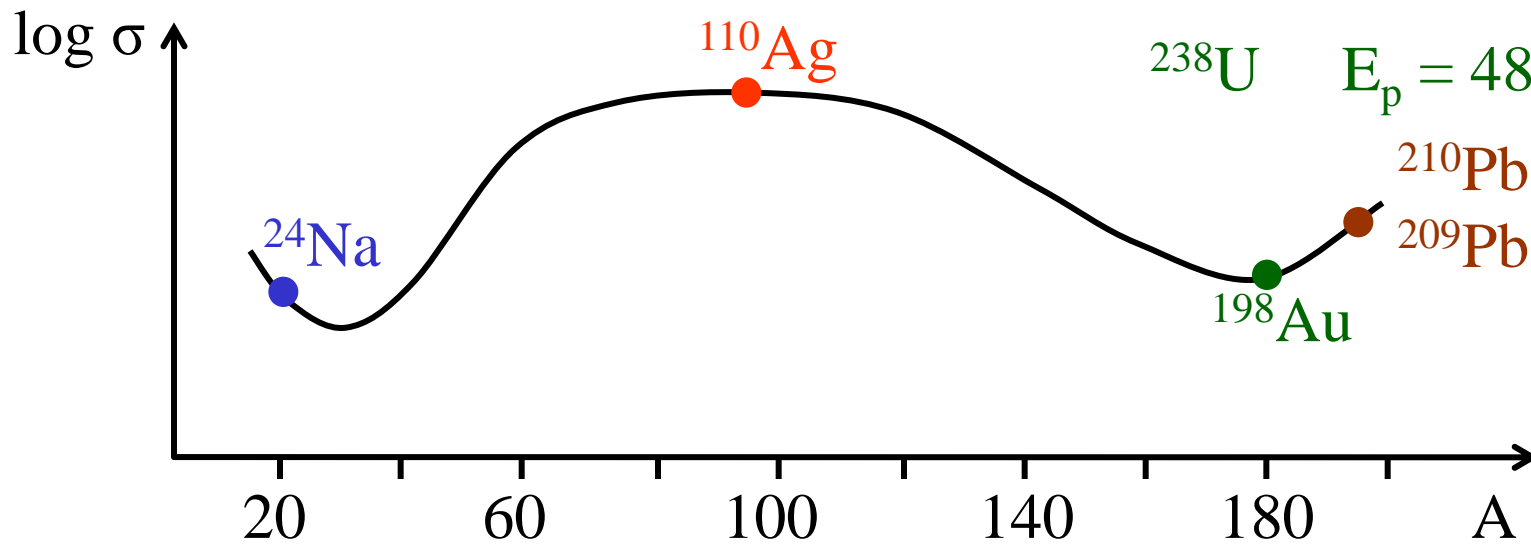
^{238}U $E_\alpha = 40$ MeV

^{238}U $E_\alpha = 30$ MeV

^{226}Ra $E_\alpha = 40$ MeV

^{226}Ra $E_\alpha = 30$ MeV

^{208}Bi $E_\alpha = 42$ MeV



^{238}U $E_p = 480$ MeV

^{210}Pb

^{209}Pb

^{198}Au

^{24}Na

^{110}Ag

Stability against spontaneous fission

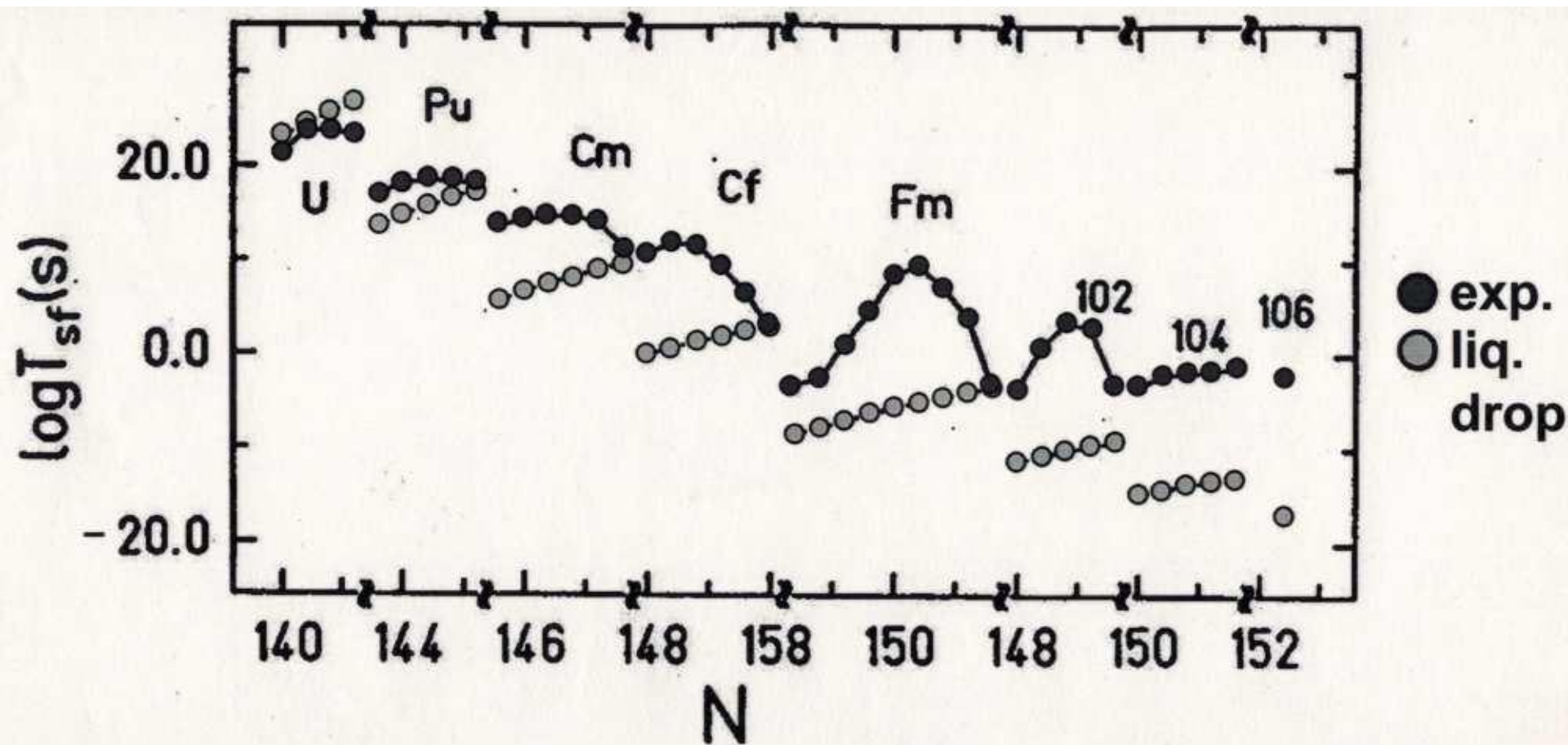
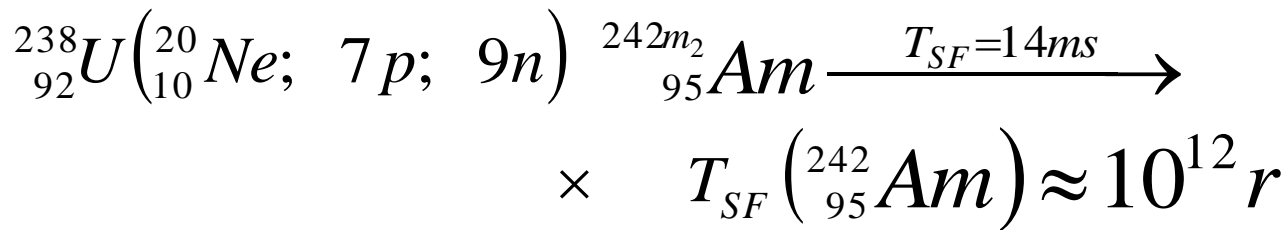
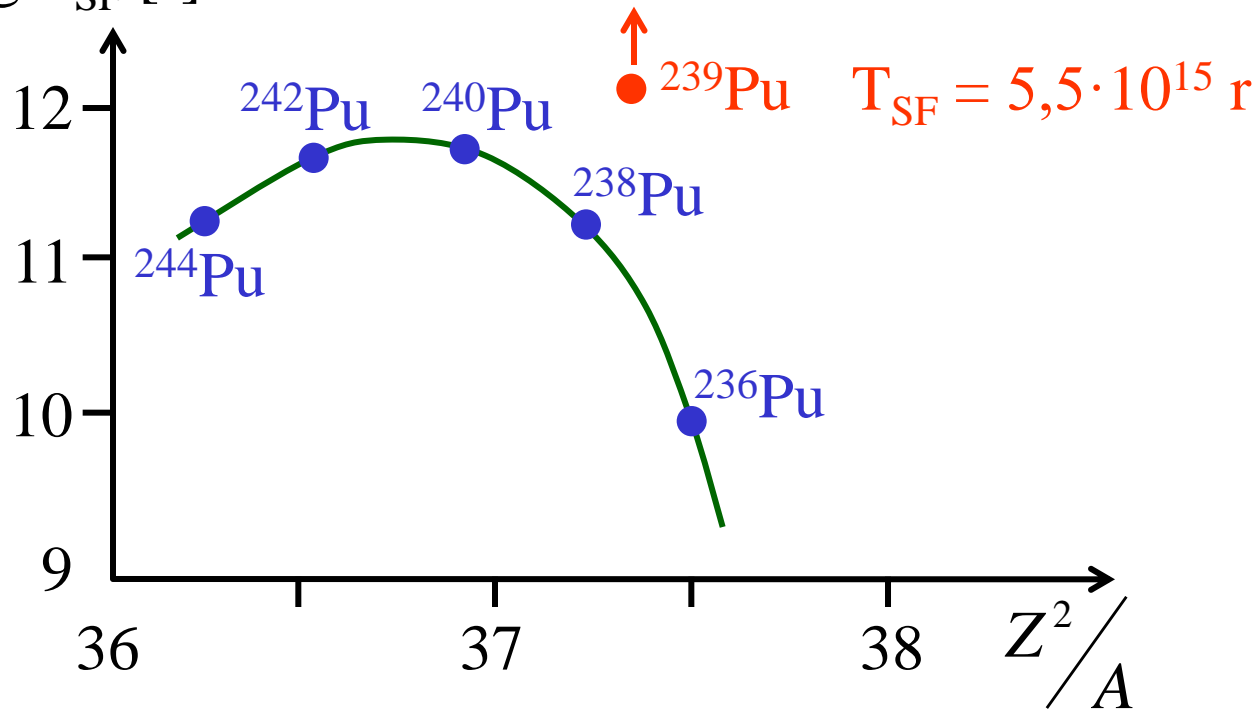


Figure 4.12 Comparison of the measured spontaneous fission half lives (●) for e-e nuclei with those expected in a simple droplet model approach (○). (Pat 89)

Spontální štěpení

$\log T_{SF} [r]$



$k = \frac{N_{n+1}}{N_n}$ Řetězové štěpné reakce

m-tá generace $N_m = N_0 \cdot k^m$

$$m = \log(N_m) - \log(N_0) / \log k$$

$k < 1$ Př.: $N_0 = 100$ $k = 0,99$

$$N_m = 1 \text{ pro } m = 458$$

$$\sum_0^m \frac{1}{n} = N_0(1 + k + k^2 + \dots) = \frac{N_0}{1-k} = 10^4 \frac{1}{n}$$

$k = 1$ $N_i = N_0$

$k > 1$ **divergentní řetěz**

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_{n+1} - N_n}{\tau} = N(k-1)\frac{1}{\tau} \xrightarrow{\int} N = N_0 e^{(k-1)t/\tau}$$

$$T = 0,69 \frac{\tau}{k-1} \quad (N_i = 2 \cdot N_0)$$

Př.: $N_0 = 100$ $k = 1,01$ $\tau = 10^{-8}$ s

t [s]	0	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
N [$\frac{1}{n}$]	100	101	110	269	$2 \cdot 10^6$	10^{45}

Chemie nascentních atomů

Nuclear reaction \Rightarrow nucleus recoils (highly charged atom)

- Kinetic (recoil) energy E_r
- Potential energy (excitation)

Undergoes reactions not possible in standard chemistry \Rightarrow

Hot Atom Chemistry

- **Velocity**

$$v_r = \sqrt{\frac{2E_r \cdot 1.602 \cdot 10^{-19}}{M \cdot 1.660 \cdot 10^{-27}}} = 1.39 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{E_r}{M}} \quad [m.s^{-1}]$$

- **Temperature**

$$T = \frac{2}{3} \frac{E_r}{k} = 7.73 \cdot 10^3 E_r \quad [K]$$

- $E_r - [eV]$
- $M - [u]$
- $T - [K]$
- $k = 8.617 \cdot 10^{-5} [eV/K]$

Chemie nascentních atomů

Example:

$$E_r = 100 \text{ eV}, M = 100 \Rightarrow$$

- $v_r = 1.4 \cdot 10^4 \text{ m/s} = 14 \text{ km/s} = 50,000 \text{ km/hr}$
- $T = 7.7 \cdot 10^5 \text{ K}$

N.B. 1st escape velocity = 7.9 km/s

2nd escape velocity = 11.2 km/s

3rd escape velocity = 16.7 km/s

Řádové hodnoty energie, rychlosti a teploty nascentních atomů

Proces	E_r [eV]	v_r [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	T [K]
IP, IK	$10^1 - 1$	$10^3 - 10^4$	$10^3 - 10^4$
β^- , β^+ , γ	$1 - 10^2$	$10^4 - 10^5$	$10^4 - 10^6$
α , p, d, n	$10^3 - 10^5$	$10^5 - 10^6$	$10^7 - 10^9$

Chemie nascentních atomů

1. Primary processes

- Nuclear reaction → break of bond.
- Nuclear physics.
- Fast.
- $\neq f(T)$, $= f(\text{concentration, state,})$

2. Secondary processes

- Thermalisation → stabilisation in a specific chemical form
- $\neq f(T)$, $= f(\text{concentration, state,})$
- **Hot atom chemistry**
 - **Hot region**
 - **Epithermal region**

3. Tertiary processes

- Standard chemistry
- $= f(T)$

	P	S	T	
$C_2H_5I(n,\gamma)$	$C_2H_5^\bullet, *I^\bullet$ $^{128}I (\beta^-, 25 \text{ min})$ $\sim 10^4 \text{ m/s}$	a) $C_2H_5^\bullet, CH_3^\bullet$ $I^\bullet \dots\dots$	b) $C_2H_5^*I, *I^-,$ $*II, CH_3^*I,$ $\dots\dots$	isotope exchange (redistribution)

Chemie nascentních atomů

Atomic recoil

$$E_r = E_y \frac{m_0 + \frac{E_y}{2c^2}}{M} = E_y \frac{m_0 + \frac{\Delta m}{2}}{M} = E_y \frac{m_{ef}}{M}$$

1) $\Delta m \ll m_0$ (heavy particles : α)

$$E_r = E_y \frac{m}{M}$$

2) $m_0 = 0$ (photons)

$$E_r = \frac{E_y^2}{2Mc^2}$$

3) $m_0 \approx \Delta m$ (β^- , β^+ , e^-)

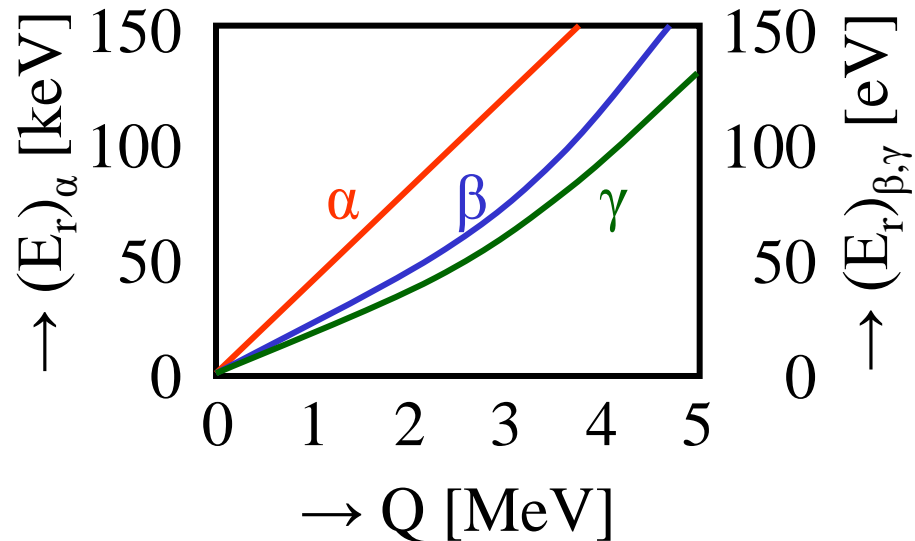
basic equation

Chemie nascentních atomů

Example:

$$E_y = 1 \text{ MeV}, M = 100 \Rightarrow$$

- $\alpha - E_r = 40 \text{ keV}$
- $\beta - E_r = 12 \text{ eV}$
- $\gamma - E_r = 5 \text{ eV}$



Odrazová energie E_r ($M = 100$)

Chemie nascentních atomů

Recoil of atom bound in a molecule

(energy of chemical bond typically 80-400 kJ/mol, i.e. 1-5 eV)

Part of E_r transforms into **translation** energy E_t

Only the rest – the activation energy E_a – available for breaking the bond.

$$E_a = E_r - E_t$$

$$E_r = \frac{i^2}{2M}$$

$$E_t = \frac{i^2}{2(M + M')}$$

$$E_t = \frac{E_r M}{M + M'}$$

$$E_a = E_r \left(1 - \frac{M}{M + M'} \right)$$

$$E_a = E_r \left(\frac{M'}{M + M'} \right)$$

1) $M' \gg M$ $E_a \rightarrow E_r$

2) $M' = M$ $E_a = \frac{E_r}{2}$

3) $M' < M$ E_a may become $< E_{bond} \Rightarrow$ no break

Chemie nascentních atomů

Example:

$^{79}\text{Br}(n,\gamma)^{80}\text{Br} + 8 \text{ MeV}$ in 2 photons. $E_{\gamma,\text{ef}} = 5 \text{ MeV}$

$E_r = 168 \text{ eV}$

a) HBr

$M_{\text{Br}} = 80$, $M_{\text{H}} = 1$, $\Delta H_{\text{dis}}(\text{HBr}) = 359 \text{ kJ/mol} \approx 3.7 \text{ eV}$

$$E_a = E_r \left(\frac{M'}{M + M'} \right) = 168 \frac{1}{80 + 1} = 2.1 \text{ eV}$$

⇒ **no break of the bond**

b) RBr

$M_{\text{Br}} = 80$, $M_{\text{min (methyl)}} = 15$, $\Delta H_{\text{dis}}(\text{RBr}) = 225 \text{ kJ/mol} \approx 2.3 \text{ eV}$

$$E_a = E_r \left(\frac{M'}{M + M'} \right) = 168 \frac{15}{80 + 15} = 26 \text{ eV}$$

⇒ **the bond breaks**

Chemie nascentních atomů

Reactions of hot atoms in (g) and (l)

Horké reakce:

Výměnná



Př.:



Substituční



Př.:



Degradační



Př.:

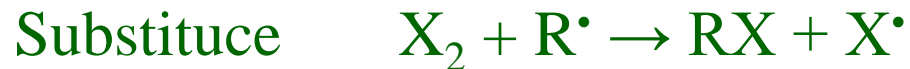
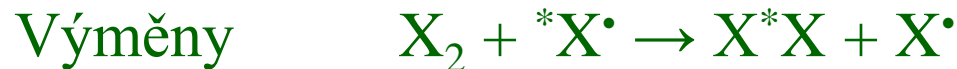


Chemie nascentních atomů

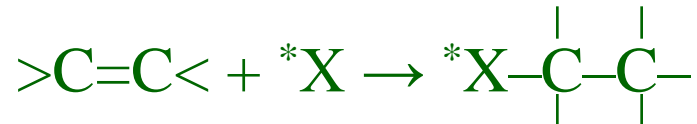
Termální radikálové reakce (1)

„Vychytávače“ radikálů

Elementární halogeny



Deriváty nenasycených uhlovodíků: (adice)



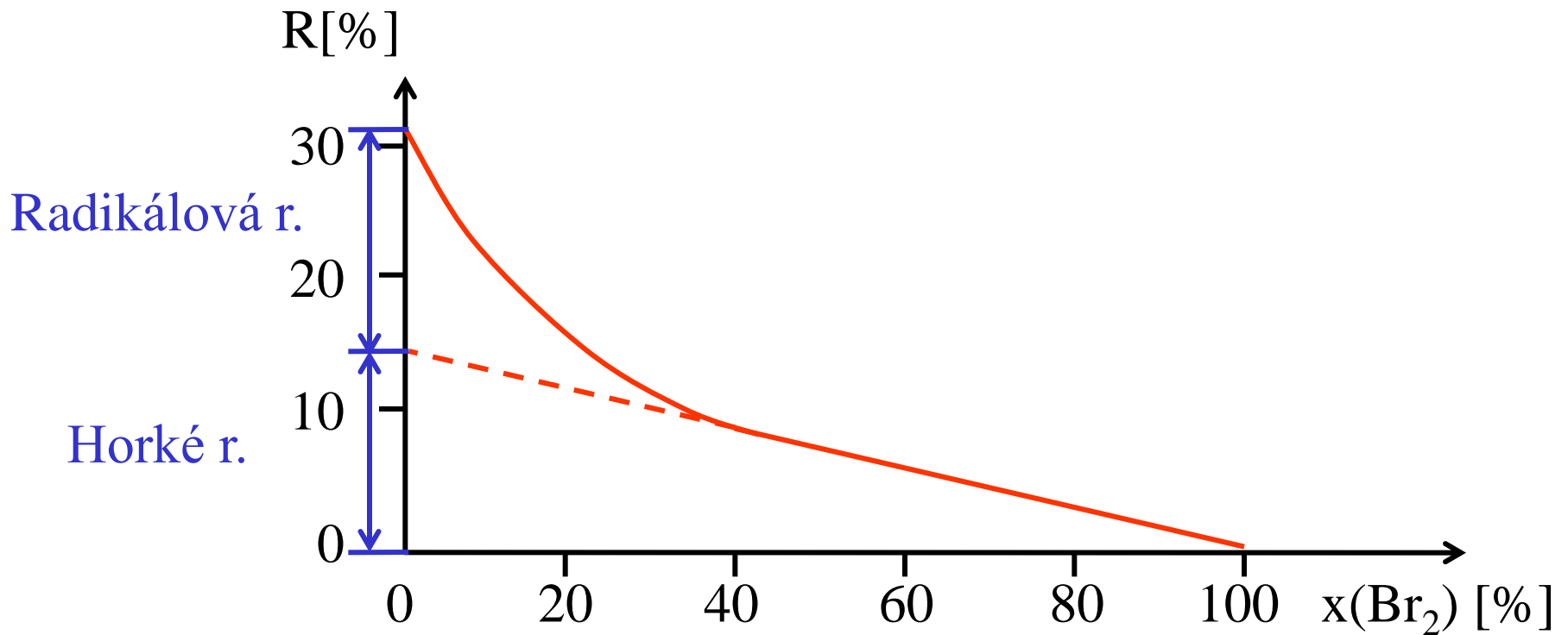
„Stabilní radikály“



Chemie nascentních atomů

Retence ^{80m}Br při ozáření $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$

($x(\text{Br}_2)$ – koncentrace vychytávače)



Chemie nascentních atomů

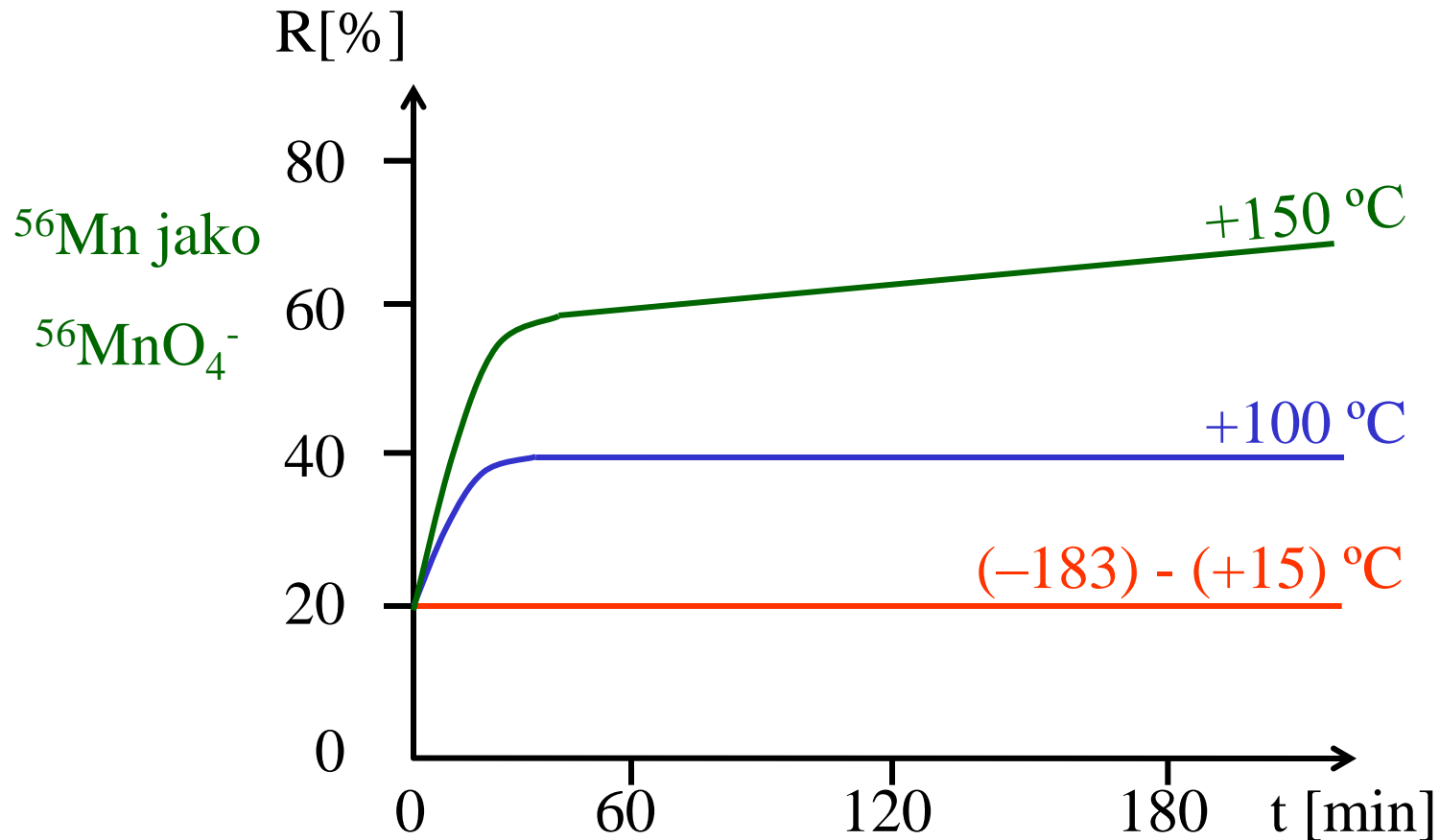
Reactions of hot atoms in solid phase

Features: small linear range of the atom, long-lasting defects of the crystalline lattice.

1. **Schottky defect** - ions leave the lattice, creating vacancies
2. **Displacement** of another atom
3. **Vacancy filling**
4. **Frenkel defect** - ions leave their lattice sites, creating vacancies, and stabilize in interstitial positions

Chemie nascentních atomů

Annealing MnO_4^- po ozáření ^1_0n („vyhojovací křivka“)



Retence

n_i chemických forem

$i = 0 \dots$ původní forma

$$a_i = \frac{N_i^*}{N_i + N_i^*} \approx \frac{A_i}{m_i} \quad \text{Měrná aktivita frakce } \underline{i}$$

$$\beta_i = \frac{a_i}{a} \approx \frac{A_i}{m_i} \cdot \frac{m}{A} \quad \text{Faktor obohacení frakce } \underline{i}$$

$$P_i = \frac{N_i^*}{N^*} = \frac{A_i}{A} \quad \text{(Radiochemický) výtěžek v } \underline{i}\text{-té frakci}$$

$$R = P_0 = \frac{N_0^*}{N^*} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n N_i^*}{N^*} = \frac{A_0}{A} \quad \text{RETENCE}$$

Procesy při reakci (n,γ)

$$E_r = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \quad \begin{array}{l} E_\gamma \rightarrow \text{MeV} \\ M \rightarrow u \end{array}$$

1 foton

$$E_r = 537 \frac{E_\gamma^2}{M} [\text{eV}] \quad E_r = \frac{E_\gamma^2}{1862 \cdot M} [\text{MeV}]$$

$$E_a = 537 \frac{E_\gamma^2}{M} \cdot \frac{M'}{M + M'}$$

2 fotony $\nless v$

$$i^2 = \frac{E_1^2}{c^2} + \frac{E_2^2}{c^2} + \frac{2E_1E_2}{c^2} \cos \nu$$

$$E_r = \frac{i^2}{2M} = 537 \frac{E_1^2 + E_2^2}{M} + 1074 \frac{E_1E_2}{M} \cos \nu [\text{eV}]$$

2 fotony, izotropní emise

(rovnoměrná distribuce, max – $\nu = 0^\circ$, min - $\nu = 180^\circ$)

$$E_r = 537 \frac{(E_1 \pm E_2)^2}{M} [\text{eV}]$$

Szilard + Chalmers

Szilard – Chalmers

1934:

Etyljodid (n,γ) \rightarrow *I oddělen extrakcí do vodného roztoku redukčního činidla \Rightarrow **n.c.a. radiojód!**

Podmínky:

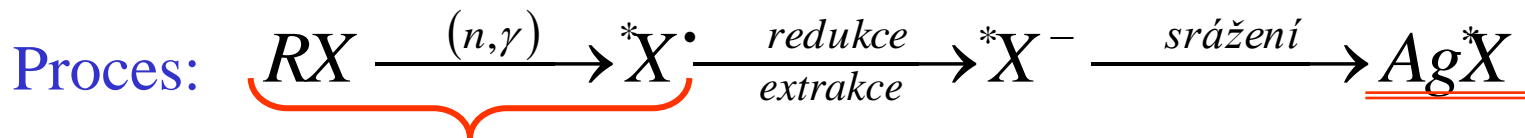
- Energetické
- Chemické
 - Existence alespoň ve dvou stabilních chemických formách (vazba, skupenství, oxidační stav....)
 - Potlačení vedlejších reakcí (retence, izotopová výměna....) – nejvhodnější organické molekuly
 - Metoda dělení forem (srážení, extrakce, elektrolýza....)

Szilard – Chalmers

Klasifikace podle terčové sloučeniny.

Organické halogenderiváty:

- ^{38}Cl , ^{80}Br , ^{82}Br , ^{128}I
- Alkyl- i arylhalogenidy
- Separace v anorganické frakci, výtěžky 50 – 100 %, anorganické ionty



Fáze: organická (l) vodná (l) (s)

Frakce: organická anorganická

Szilard – Chalmers

Klasifikace podle terčové sloučeniny.

Organokovové sloučeniny:

•10 – 90 % různé anorganické formy

Příklady:

1.Kys. dimetylarsoniová (kakodylová)

^{75}As (100 %), $\sigma = 4,3 \text{ b}$

(n, γ), rozpuštění – 70 – 90 % ^{76}As jako $^{76}\text{AsO}_3^-$ (beznosičový)

Jinak jen $^{76}\text{Ge}(p,n)^{76}\text{As}$

2.8-hydroxychinolinát Ni^{2+} v org. rozpouštědle

^{64}Ni (0,91 %), $\sigma = 1,49 \text{ b}$

(n, γ), extrakce do vody – až 80 % ^{65}Ni jako $^{65}\text{Ni}^{2+}$ (beznosičový)

Jinak jen $^{65}\text{Cu}(n,p)^{65}\text{Ni}$

Szilard – Chalmers

Klasifikace podle terčové sloučeniny.

Bezokyslíkaté anorganické komplexní ionty:

•Uvolnění z komplexního a stabilizace v jednoduchém iontu

Příklady:



(n, γ), (rozpuštění) srážení hydroxidů – 80 % $^{60}\text{Co}^{3+}$ lze srážet



(n, γ), (rozpuštění) srážení – ~ 33 % ^{124}Sb se sráží jako sulfid

Jinak jen $^{122,124}\text{Sn}(p,n)^{122,124}\text{Sb}$



(n, γ), $^{59}\text{Fe}^{3+}$ lze separovat různě, např. spolusrážení s $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 33 %, extrakce etherem – 45 %, na měniči kationtů...



(n, γ), $^{186,188}\text{ReO}_4^-$ lze separovat různě, $\beta \geq 10^3$

Szilard – Chalmers

Klasifikace podle terčové sloučeniny.

Kyslíkaté anionty polyvalentních prvků:

• Změna oxidačního stavu

Příklady:

1. XO_3^- (X = Cl, Br, I)

$(n, \gamma) \rightarrow *X^-, P = 70\text{--}100 \%$

2. MnO_4^-

$(n, \gamma) \rightarrow \text{Mn}^{2+}, \text{Mn}^{4+}$

srážení $^{56}\text{MnO}_2 - \sim 95 \%$, srážení $^{56}\text{MnCO}_3 - \sim 70 \%$

3. PO_4^{3-} (obdobně AsO_4^{3-})

$(n, \gamma) \rightarrow \sim 50 \%$ jako PO_4^{3-} , $\sim 50 \%$ HPO_3^{2-}

4. Au

Slabě elektropozitivní – $(n, \gamma) \rightarrow ^{198}\text{Au}^0$

$\text{Na}_3[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2] - (n, \gamma) \rightarrow \text{amalgám } ^{198}\text{Au}$

$\text{AuCl}_3 - (n, \gamma) \rightarrow \sim 80 \%$ ^{198}Au se zachytí na koloidním zlatě

Szilard – Chalmers

Klasifikace podle terčové sloučeniny.

Anorganické kovalentní sloučeniny:

- Změna chemické formy

Příklady:

1. AsH_3 (g)

$(n, \gamma) \rightarrow {}^{76}\text{As}^{n+}$, lze zachytit na elektrodě

2. H_2S (g)

(n, γ) , rozpuštění v $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \sim 98\% \text{ } {}^{35}\text{S}^0$, zbytek S^{2-} , SO_3^{2-} , SO_4^{2-}

Heterogenní soustavy:

- Terčová sloučenina dispergována v kapalně fázi (přímo nebo adsorbována na nosiči). Obvykle velké β , ale třeba větší E_T .

Příklady:

1. Cl_2 adsorbován na aktivní uhlí dispergovaném ve vodě

$(n, \gamma) \rightarrow \sim 80\% \text{ } {}^{38}\text{Cl}^-$ ve vodné fázi, $\beta \geq 10^3$

Chemie nascentních atomů

Retence

Primární

energetika $R \rightarrow 0$

experiment $R \neq 0$

Sekundární – lze ovlivnit

ředění inertem

skupenství

Terciální – lze ovlivnit

teplota

čas

vychytávače

Chemie nascentních atomů

Retence v organických halogenderivátech

V org. fázi vždy největší výtěžek v terčové sloučenině

Příklad:

$\text{CH}_3\text{Cl} (n,\gamma) \Rightarrow 10$ radioaktivních chloroderivátů

- Org. fáze ≈ 21 %
 - $\frac{1}{2}$ jako CH_3^*Cl
 - Zbytek CH_2^*ClCl , $\text{C}_2\text{H}_5^*\text{Cl}$, $\text{C}_2\text{H}_4^*\text{ClCl}$, $\text{C}_3\text{H}_7^*\text{Cl}$

Chemie nascentních atomů

Retence v organických halogenderivátech

Vliv experimentálních podmínek na retenci

1. Teplota

- Sekundární procesy – žádný vliv:

Příklad:

$\text{CH}_3\text{I} (n, \gamma) \Rightarrow$ výtěžek $\text{CH}_2\text{I}^*\text{I}$ (produkt horké reakce)

nezávislý na teplotě

Výtěžek = 11 % pro $T \in \langle -195^\circ\text{C}; 15^\circ\text{C} \rangle$

- Terciální procesy – velký vliv:

Příklad:

Retence ^{128}I při ozařování $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$

– $T = 20^\circ\text{C}$ – $R = 40\%$

– $T = 50^\circ\text{C}$ – $R = 100\%$

Izotopová výměna $\text{C}_2\text{H}_5\text{I} \Leftrightarrow ^{128}\text{I}_2$

Chemie nascentních atomů

Retence v organických halogenderivátech

Vliv experimentálních podmínek na retenci

2. Skupenství

- Vliv na sekundární i terciální procesy
- Obecně: $R(g) < R(l) < R(s) \Leftarrow$ roste vliv reakční radikálové klece

Příklad:

Terč. látka	R v (l)	R v (g)
C_2H_5Br	75 %	4,5 %
C_2H_4Br	31 %	6,9 %

Chemie nascentních atomů

Retence v organických halogenderivátech

Vliv experimentálních podmínek na retenci

3. Ředění inertní látkou

- Vliv na sekundární i terciální procesy
- Obecně: Vliv horkých reakcí klesá, vliv terciálních procesů roste \Rightarrow obvykle menší retence

Příklad:

Retence v CBr_4 při ředění $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

$c(\text{CBr}_4)$ [%]	R [%]
100	60
1,15	28
0,74	13
0,45	2
0,064	0

Chemie nascentních atomů

Retence v organických halogenderivátech

Vliv experimentálních podmínek na retenci

4. Časový faktor

- $R = f(t)$, t – čas mezi koncem ozařování a separací
- Důsledek terciálních procesů

Příklad:

Irradiation of CH_3I

	Separation	Irradiation		
		10 min	60 min	120 min
R [%]	2 min	55 %	60 %	72 %
	60 min			88 %

Pseudomonomolekulární výměna $\text{CH}_3\text{I} \leftrightarrow {}^{128}\text{I}_2$

\Rightarrow pro $T_{\text{irr}} > 4 \cdot T_{1/2}$ platí $R = \text{konst}$ ($T_{1/2}({}^{128}\text{I}) = 25 \text{ min}$)

Chemie nascentních atomů

Retence v organických halogenderivátech

Vliv experimentálních podmínek na retenci

5. Vychytávače

- Vliv na termální radikálové reakce na rozhraní sekundárních a terciálních procesů
- Pro organické halogenderiváty:
 - Elementární halogeny – snižují retenci

Příklad:

Čistý $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$: $R = 32 \%$, s 20% Br_2 : $R = 12 \%$

 - Nenasycené uhlovodíky – zvyšují retenci (vychytávají radikály)

Chemie nascentních atomů

Retence ve vodných roztocích anorganických látek

Sekundární reakce s molekulami vody.

1. $R \neq f(\text{pH})$

Příklad:

- ClO_4^- (n, γ) – 100 % $^{38}\text{Cl}^-$ pro $\text{pH} \in \langle 0; 14 \rangle$
- PO_4^{3-} a HPO_4^{2-} (n, γ) – $R = 50$ % (50 % jako $^{32}\text{PO}_4^{3-}$) pro $\text{pH} \in \langle 0; 14 \rangle$

Mechanismus:

1. $\text{PO}_4^{3-} \rightarrow ^{32}\text{PO}_3^{3-} + \text{O}^\bullet$ (odtržení O při odrazu)
2. $\text{PO}_4^{3-} \rightarrow ^{32}\text{PO}_3^{2-} + \text{O}^-$ (odtržení O^- při odrazu)
3. $^{32}\text{PO}_3^{2-}$ (hydrolýza, oxidace) $\rightarrow ^{32}\text{PO}_4^{3-}$

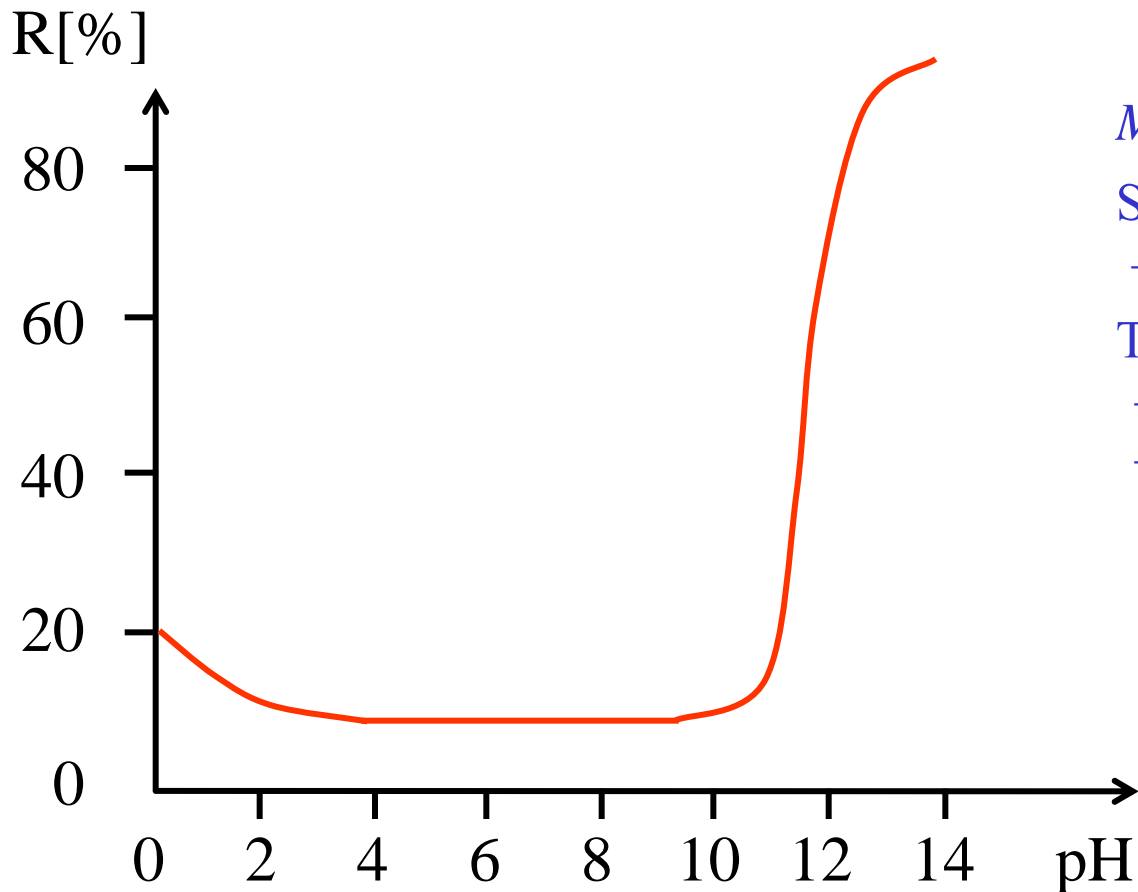
Reakce se účastní jen voda \Rightarrow nezávisí na pH

Chemie nascentních atomů

Retence ve vodných roztocích anorganických látek

2. $R = f(\text{pH})$

Příklad: Závislost retence v KMnO_4 po reakci (n,γ) na pH



Mechanismus:

Sekundární:

– $^{56}\text{Mn}^{2+}$ a $^{56}\text{MnO}_4^- \neq f(\text{pH})$

Terciální:

– $^{56}\text{Mn}^{2+} \rightarrow ^{56}\text{MnO}_2$

– $^{56}\text{Mn}^{2+} \rightarrow ^{56}\text{MnO}_4^-$

Poměr = $f(\text{pH})$

Energetika ostatních binukleárních reakcí

(x,y)

$$\bar{E}_r = E_x \left[\frac{Mm_x}{(M+m_y)^2} + \frac{m_y(M+m_y-m_x)}{(M+m_y)^2} \cdot \left(1 + \frac{Q}{E_x} \cdot \frac{M+m_y}{M+m_y+m_x} \right) \right]$$

$M \gg m_x; M \gg m_y$

$$\bar{E}_r = E_x \frac{m_x}{M} + (E_x + Q) \frac{m_y}{M}$$

Př.: $M = 100; m_x = m_y = 1; Q = E_x = 1 \text{ MeV (!)}$
 $\rightarrow \bar{E}_r = 30 \text{ keV}$

(n_t,y); (n_t,f) $E_x \rightarrow 0$

$$\bar{E}_r = Q \frac{m_y}{M+m_y} \left[(n,p);(n,\alpha) - Q \approx 10^6 \text{ eV}; \frac{m}{M} \approx 10^{-2} \right]$$

$$(\bar{E}_r)_1 = Q \frac{M_2}{M_1 + M_2} \quad (\bar{E}_r)_2 = Q \frac{M_1}{M_1 + M_2} \quad (n,f) \quad Q \approx 10^8; \frac{M}{\sum M} \approx 1/2$$

Energetika ostatních binukleárních reakcí

(γ, y) – „jaderný fotoefekt“

$$\bar{E}_r = \frac{M}{(M + m_y)^2} \cdot \frac{E_\gamma^2}{2c^2} + \frac{m_y}{(M + m_y)^2} \left[(E_\gamma + Q) \cdot (M + m_y) - \frac{E_\gamma^2}{2c^2} \right]$$

$$E_\gamma < 10 \text{ MeV} \rightarrow i_\gamma = E_\gamma/c \rightarrow 0$$

$$\bar{E}_r = (E_\gamma + Q) \cdot \frac{m_y}{M + m_y}$$

Př.: $M = 100$; $m_y = 1$; $Q = -8 \text{ MeV}$; $\bar{E}_\gamma = 10 \text{ MeV}$
 $\rightarrow \bar{E}_r = 20 \text{ keV}$

Výhoda: (x, y) – neizotopní produkt \Rightarrow běžné separační metody

Obecný problém: ozařování v cyklotronu \Rightarrow pouze pevné látky

Důsledek: nejvíce studovány (exoergické) reakce s (tepelnými) neutrony, zejména (n, p) – ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$, ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$, ${}^{35}\text{Cl}(n, \alpha){}^{32}\text{P}$ a endoergická ${}^{32}\text{S}(n, p){}^{32}\text{P}$ a (n, f)

Reakce při neutronových aktivacích

Třídění podle vznikajícího nuklidu



Tritiace. $\text{T}^+(\text{g})$ – reakce s uhlovodíky:

Příklad: T^+ s C_2H_6

- Sekundární r.: $\text{C}_2\text{H}_5\text{T}$, CH_3T , $\text{C}_2\text{H}_4\text{T}^*$, CH_2T^*
- Terciální r.: HT



Velké $E_r \Rightarrow$ lze (s). Ozařování Li_2CO_3 s tritiovanou látkou (např. glukózy).
Nespecifická tritiace.



Reakce dle terčové sloučeniny. Využití – značené sloučeniny. Sekundární reakce při rozpouštění.

$\text{NH}_3(\text{n},\text{p}) \rightarrow {}^{14}\text{CH}_4$ (téměř kvantitativně).

Kyslíkaté sloučeniny $\text{N} \rightarrow {}^{14}\text{C}-\text{O}$

Nitridy \rightarrow karbidy: $\text{Be}_2{}^{14}\text{C} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Be}(\text{OH})_2 + \underline{{}^{14}\text{CH}_4}$

Amonné soli (síran, bromid): ${}^{14}\text{CH}_3\text{NH}_2 + \text{další } ({}^{14}\text{C}_x\text{H}_y, {}^{14}\text{CO}_x, {}^{14}\text{CN}^- \dots)$

Heterocyklické \rightarrow aromatické – malé procento (př.: chinolin \rightarrow naftalen)

Reakce při neutronových aktivacích

^{32}P $^{32}\text{S}(\text{n},\text{p})^{32}\text{P}$

Anorganicky vázaná S \rightarrow PO_4^{3-} , PO_3^{3-} , PO_2^{3-} , (PH_3) . Preference vyšších valencí

Příprava ^{32}P s vysokou a : CS_2 + bílý P, ozáření, vypadne červený P s ^{32}P

$^{35}\text{Cl}(\text{n},\alpha)^{32}\text{P}$

Kyslíkaté anionty \rightarrow PO_4^{3-} , Cl^- \rightarrow nižší valence

^{35}S $^{35}\text{Cl}(\text{n},\text{p})^{35}\text{S}$ $\sigma = 30 \text{ fm}^2 (0,3 \text{ b})$ $\bar{E}_r = 17 \text{ keV}$

Různé formy, převládá $^{35}\text{SO}_4^{2-}$, ale např.

$\text{HCl}(\text{g})$: i $\text{S}^0 + \text{S}^{2-} + \text{SO}_3^{2-} \dots$

Tuhé látky: velký vliv terciálních reakcí při rozpouštění.

Příklad:

KCl \rightarrow v krystalu $^{35}\text{S}^{2-}$, $^{35}\text{S}^0$, $^{35}\text{S}-\text{Cl}_x$, rozpouštění \rightarrow všechny valence

Org. systémy – složité

Příklad:

NCA ^{35}S : $\text{CCl}_4(\text{n},\text{p}) \rightarrow$ destilace \rightarrow oxidace \Rightarrow $^{35}\text{SO}_4^{2-}$

Reakce při neutronových aktivacích

Š.P. $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f}) \quad \sigma = 58\,400 \text{ fm}^2 (584 \text{ b})$

Fragmenty: $E_r = 40\text{--}120 \text{ MeV}$, Q až $+20$. Stabilizace jako kationt (př. $^{95}\text{Zr}^{4+}$), atom (př. ^{85}Kr), či aniont.

Příklad:

*I: $\text{I}_2 + \text{I}^- + \text{IO}^- + \text{IO}_3^- + \text{IO}_4^-$ – poměr ve frakcích různý pro různé izotopy – závisí na cestě vzniku (primární odštěpek, sekundární produkt).

Reakce při aktivaci nabitými částicemi a γ

Interference nejaderných účinků – reakce s produkty radiačně-chemických reakcí. Třídění podle typu jaderné reakce.



Většina Cl jako Cl^- , vyšší valence zanedbatelné. Nezávisí na terčové formě (např. Na_2SO_4 vs. $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$).



^{35}S obvykle ve stejné valenci (formě) jako v terči.

Příklad: S_0 , FeS_2



^{35}S obvykle v nízkých valencích. *Příklad:* $\text{RbCl} \rightarrow \text{S}^{2-}$

Reakce při aktivaci nabitými částicemi a γ



Obdobně jako při (n, γ). Br obvykle v nízkých valencích.

Příklad: $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}(\gamma, n) \rightarrow \text{Br}$ lze extrahovat vodou jako ${}^{78,80}\text{Br}^-$



Různé produkty při reakci v (s) a (l)

Příklad: CO_2 a uhličitany

- (s) $\rightarrow {}^{11}\text{CO} + {}^{11}\text{CO}_2 - 1 : 1$
- (l) $\rightarrow 100 \% {}^{11}\text{CO}$

T.I. Mechanismus případ od případu

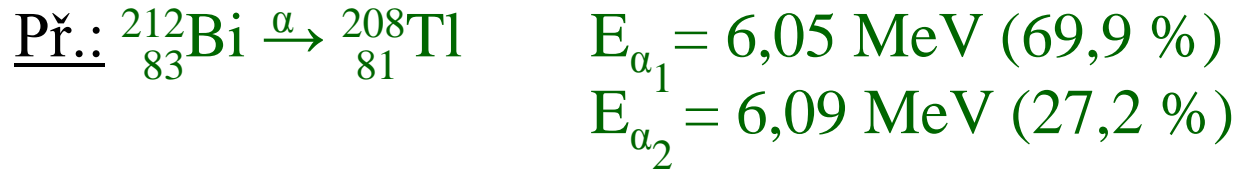


Mechanismus: elementární P \rightarrow rozpouštění \rightarrow redukce (PH_3) nebo hydrolyza (H_3PO_2) podle podmínek.

Procesy při radioaktivních přeměnách

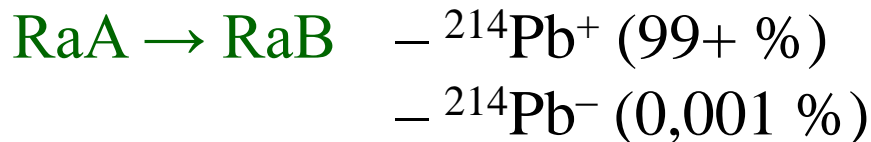
α

$$E_r = E_\alpha \frac{m_\alpha}{M} = Q \frac{m_\alpha}{M + m_\alpha}$$

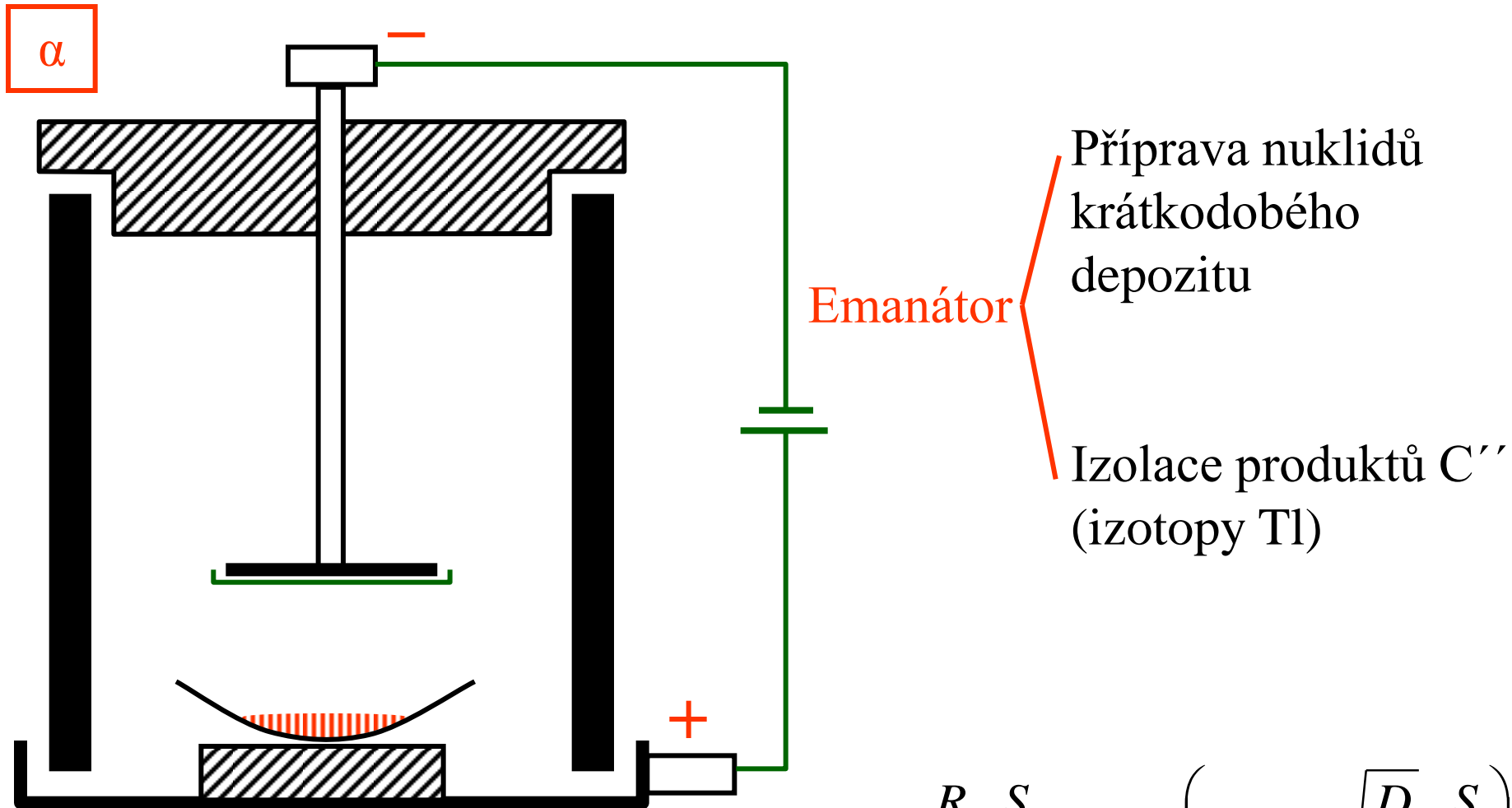


$$\rightarrow E_r ({}^{208}\text{Tl}) \doteq \underline{116} \text{ keV}$$

„Agregátový odraz“



Procesy při radioaktivních přeměnách



Emanance

$$E_m = E_{m_r} + E_{m_d}$$

$$E_{m_r} = \frac{R}{4} \cdot \frac{S}{V} \quad \left(E_{m_d} = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \cdot \frac{S}{V} \right)$$

$$(R \approx 10^{-6} - 10^{-4} \text{ cm}; E_R \approx 10^4 \text{ eV})$$

Procesy při radioaktivních přeměnách

β

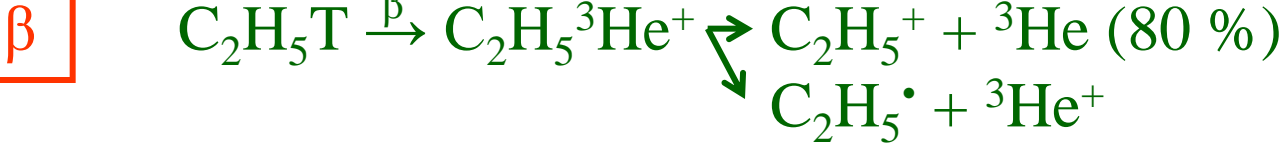
$$\left. \begin{array}{l} E_{r,\max} \\ (E_\nu = 0) \end{array} \right\} \begin{cases} E_r = \frac{E_\beta^2}{2Mc^2} + E_\beta \frac{m_\beta}{M} [J] \\ E_r = 537 \frac{E_\beta^2}{M} + 549 \frac{E_\beta}{M} = 537 \frac{E_\beta}{M} (E_\beta + 1,02) [eV] \end{cases}$$

$$\left. \begin{array}{l} E_\nu > 0 \\ > \beta v = v \end{array} \right\} E_r = \frac{537}{M} \left(E_\beta^2 + 1,02 E_\beta + E_\nu^2 + 2 E_\nu \sqrt{E_\beta^2 + 1,02 E_\beta} \cos \nu \right)$$

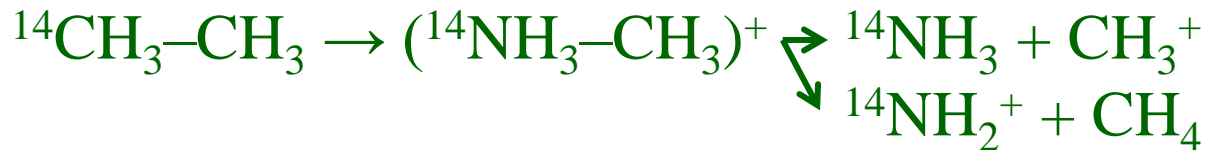
$E_{\beta,\max}$ [MeV]	0,1	0,5	1	2	5
$E_{r,\max}$ [eV]	0,6	4,1	10,8	32,4	161,6
\bar{E}_r [eV]	0,2	1,4	3,6	10,8	53,9

$$\bar{E}_r = E_{r,\max} / 3$$

Procesy při radioaktivních přeměnách



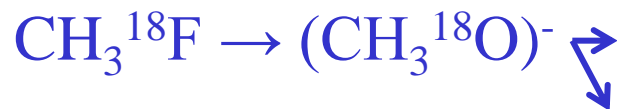
(g) T: $T_{1/2} = 12,26 \text{ r}$; $E_{\beta, \max} = 19 \text{ keV}$
 $E_{r, \max} = 3,5 \text{ eV}$



^{14}C : $T_{1/2} = 5730 \text{ r}$; $E_{\beta, \max} = 156 \text{ keV}$
 $E_{r, \max} = 7,0 \text{ eV}$

Procesy při radioaktivních přeměnách

β

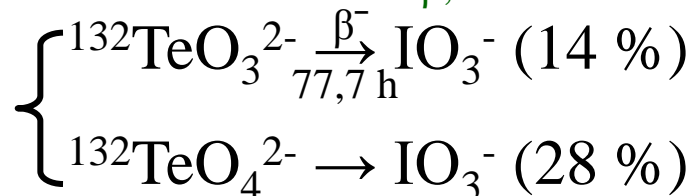


$(E_{\beta, \text{max}} = 0,22 \text{ MeV})$

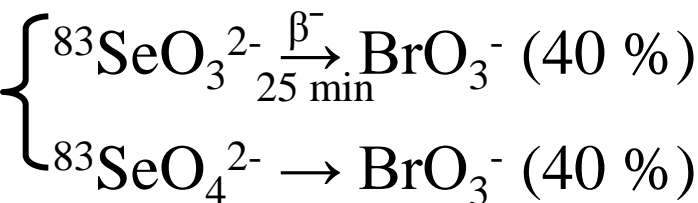
(1,s)

výchozí chem.
forma

závisí



nezávisí



$(E_{\beta, \text{max}} = 1,8 \text{ MeV})$

EZ

$E_r = 537 \frac{E_v^2}{M} \approx 537 \frac{Q^2}{M} [\text{eV}]$



$\rightarrow E_r = \underline{9,6 \text{ eV}}$

Procesy při emisi γ , IP a IK

0 konverze $(E_r)_\gamma = 537 \frac{E_\gamma^2}{M} [eV]$

100 % konverze $(E_r)_e = 537 \frac{E_\gamma - E_v}{M} (E_\gamma - E_v + 1,02) [eV]$

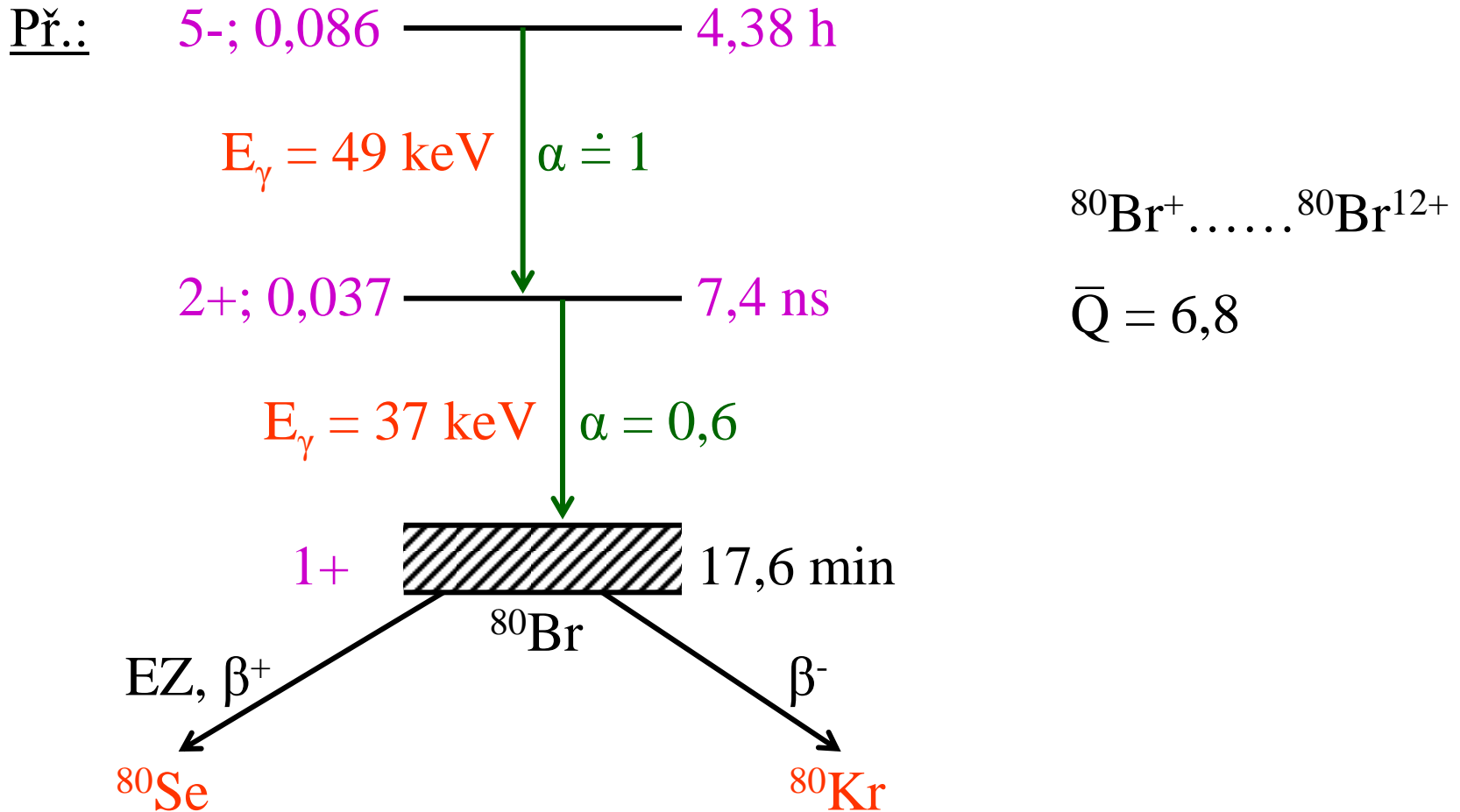
$Q_{IP} [MeV]$	0,05	0,1	0,2	0,5
$(E_r)_\gamma [eV]$	0,013	0,05	0,21	1,3
$(E_r)_e [eV]$	0,17	0,47	1,16	3,9

$E_X < E_v$ x roztržení



Augerova kaskáda

Procesy při emisi γ , IP a IK



Procesy při emisi γ , IP a IK

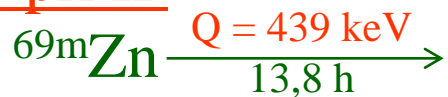
$$E = 1,44 \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r} [eV] \quad r [\text{nm}]$$

Z_1, Z_2 – el. náboje

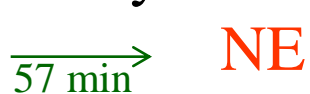
Odpudivá potenciální energie v CH_3Br [eV]

Náboj CH_3	Náboj Br									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7,6	15,2	23	30	38	46	53	61	68	76
2	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150

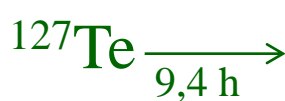
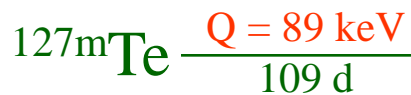
Reakce při IP



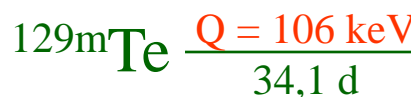
diethyl roztržení ...



α
0,05



ANO } 0,5 - 1



ANO

Př.: Separace izomerů (Segré, 1939): ${}^{80,80\text{m}}\text{Br}-\text{C}(\text{CH}_3)_3$

Szilard + Chalmers

Dělení izomerů ^{80m}Br a ^{80}Br z $(\text{CH}_3)_3\text{C} - ^{80,80m}\text{Br}$ extrakcí H_2O

