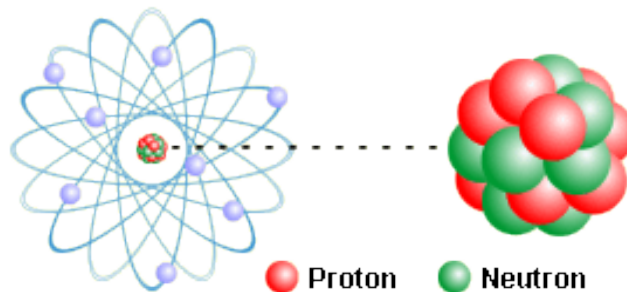




Úvod do jaderné a reaktorové fyziky

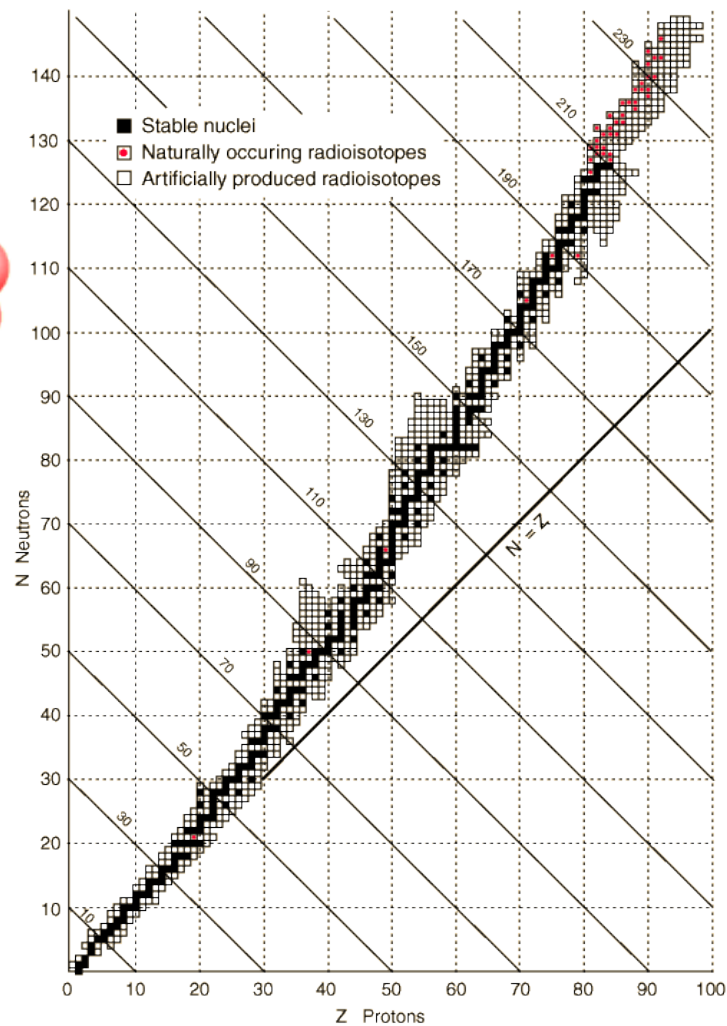
Filip Fejt
KJR FJFI ČVUT v Praze

Atom a atomové jádro

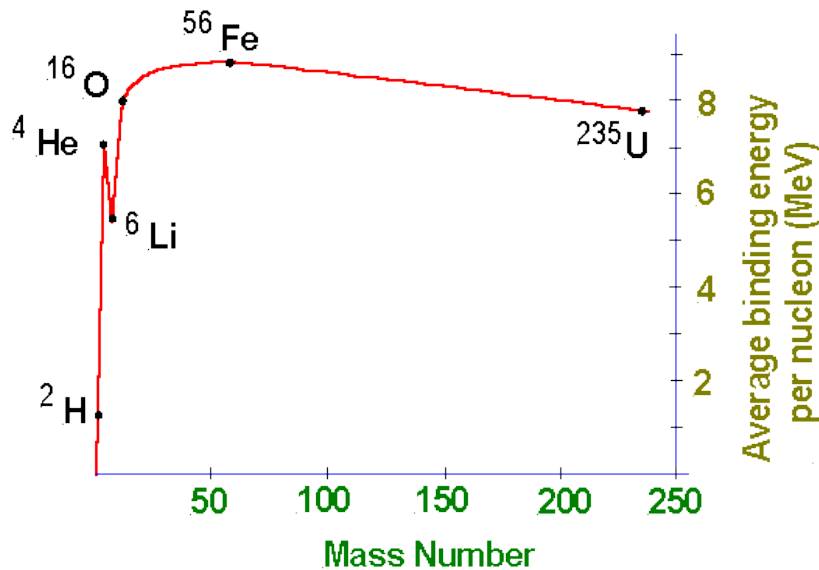


| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | |
| 1 | H 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | He 2 |
| 2 | Li 3 | Be 4 | | | | | | | | | | | | B 5 | C 6 | N 7 | O 8 | F 9 | Ne 10 |
| 3 | Na 11 | Mg 12 | | | | | | | | | | | Al 13 | Si 14 | P 15 | S 16 | Cl 17 | Ar 18 | |
| 4 | K 19 | Ca 20 | Sc 21 | Ti 22 | V 23 | Cr 24 | Mn 25 | Fe 26 | Co 27 | Ni 28 | Cu 29 | Zn 30 | Ga 31 | Ge 32 | As 33 | Se 34 | Br 35 | Kr 36 | |
| 5 | Rb 37 | Sr 38 | Y 39 | Zr 40 | Nb 41 | Mo 42 | Tc 43 | Ru 44 | Rh 45 | Pd 46 | Ag 47 | Cd 48 | In 49 | Sn 50 | Sb 51 | Te 52 | I 53 | Xe 54 | |
| 6 | Cs 55 | Ba 56 | La 57 | Hf 72 | Ta 73 | W 74 | Re 75 | Os 76 | Ir 77 | Pt 78 | Au 79 | Hg 80 | Tl 81 | Pb 82 | Bi 83 | Po 84 | At 85 | Rn 86 | |
| 7 | Fr 87 | Ra 88 | Ac 89 | Rf 104 | Db 105 | Sg 106 | Bh 107 | Hs 108 | Mt 109 | Ds 110 | Rg 111 | Uub 112 | Uut 113 | Uuq 114 | Uup 115 | Uuh 116 | Uus 117 | Uuo 118 | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 6 | Ce 58 | Pr 59 | Nd 60 | Pm 61 | Sm 62 | Eu 63 | Gd 64 | Tb 65 | Dy 66 | Ho 67 | Er 68 | Tm 69 | Yb 70 | Lu 71 |
| 7 | Th 90 | Pa 91 | U 92 | Np 93 | Pu 94 | Am 95 | Cm 96 | Bk 97 | Cf 98 | Es 99 | Fm 100 | Md 101 | No 102 | Lr 103 |



Vazbová energie



- Hmotnost jádra se nerovná součtu hmotnosti neutronů a protonů, které jádro obsahuje
- hmotnostní úbytek $\Delta m = Zm_p + Nm_N - mA$, činí řádově % hmotnosti jádra
- hmotnostní úbytek úměrný vazbové energii $W = \Delta mc^2$



Jednotky používané v jaderné fyzice

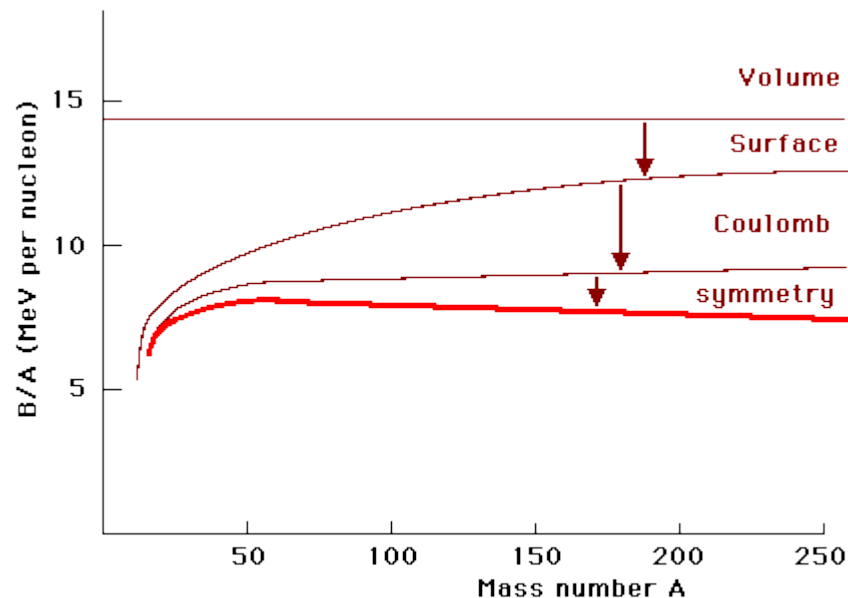
- Atomová hmotnostní jednotka (u) = $1/12$ hmotnosti atomu uhlíku C-12
 - přibližně rovna hmotnosti nukleonu: $1 u = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
- Elektron volt (eV) = energie získaná jednotkovým nosičem náboje při průchodu potenciálovým rozdílem 1 volt
 - $1 \text{ eV} = 1,60218 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- $1 u \sim 931.49 \text{ MeV}$ (dle Einsteinova principu ekvivalence)



Síly uplatňující se ve vazbě atomového jádra

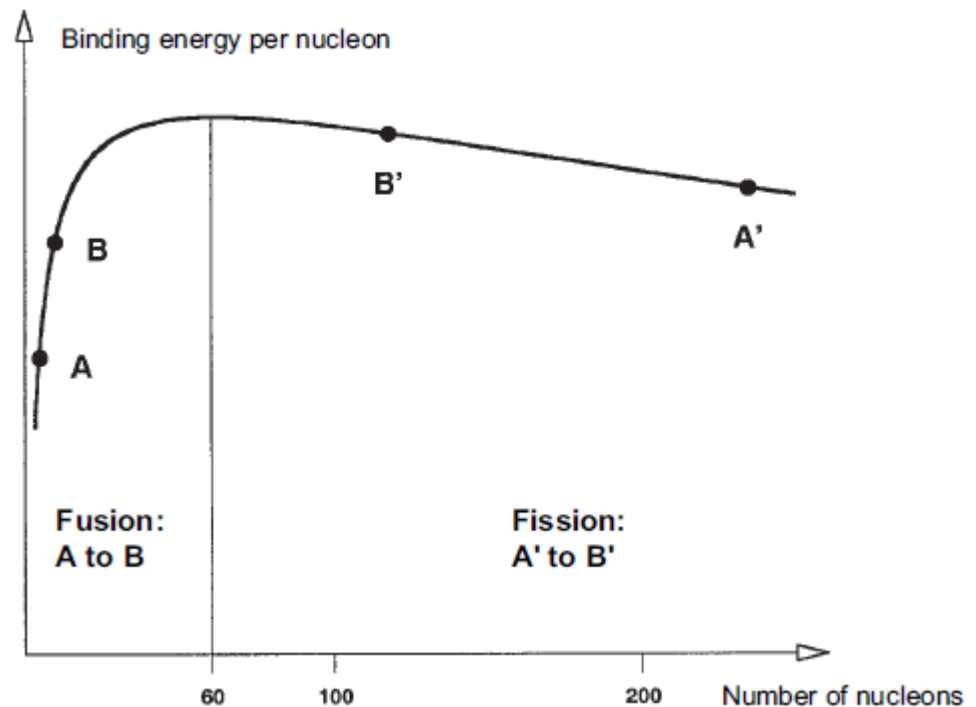
- Elektrická (Coulombovská)
- Silná (jaderná).
 - přitažlivá síla mezi nukleony libovolného typu
 - velmi silná, s krátkým dosahem
- Přeněji popisuje „standardní model“
 - interakce mezi kvarky

Kapkový model jádra



Principy uvolňování jaderné energie

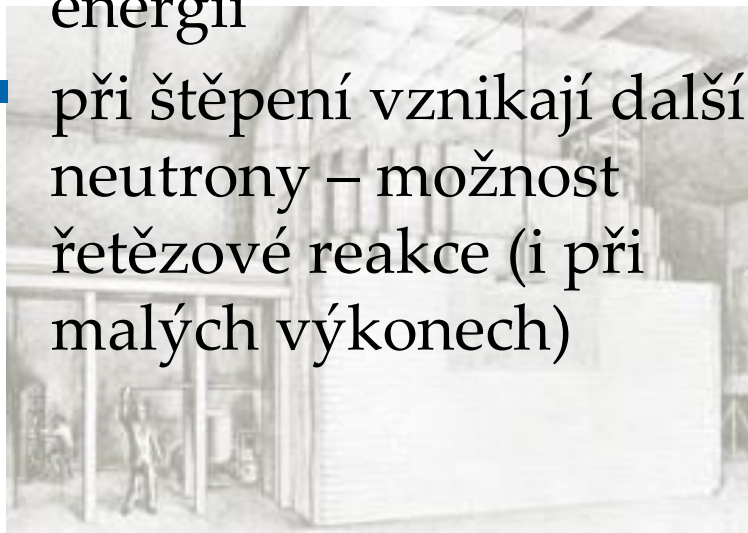
- Zvyšování W/A – uvolnění nadbytečné energie
- Fúze - *slučování lehkých jader* ($A \Rightarrow B$)
- štěpení - *těžká jádra* ($A' \Rightarrow B'$)



Základní rozdíly mezi štěpením a fúzí

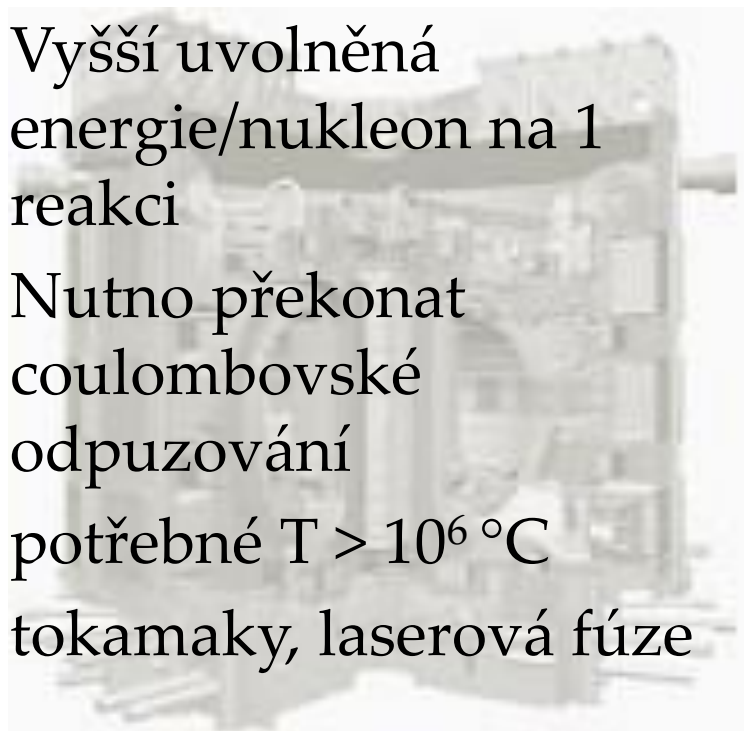
Štěpení

- štěpení možné tepelnými neutrony s velmi malou energií
- při štěpení vznikají další neutrony – možnost řetězové reakce (i při malých výkonech)



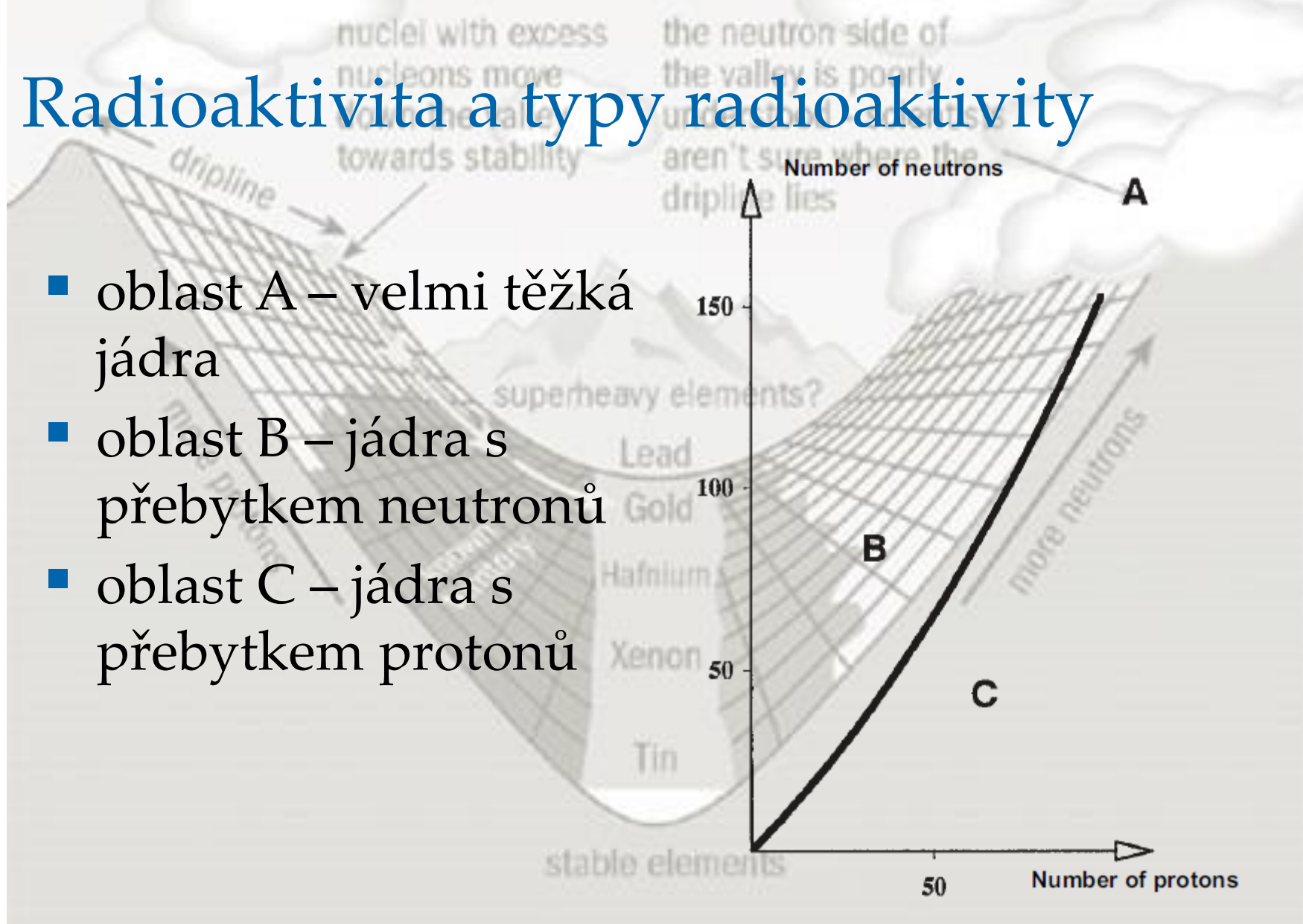
Fúze

- Vyšší uvolněná energie/nukleon na 1 reakci
- Nutno překonat coulombovské odpuzování
- potřebné $T > 10^6$ °C
- tokamaky, laserová fúze



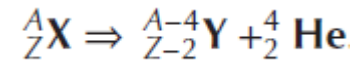
Radioaktivita a typy radioactivity

- oblast A – velmi těžká jádra
- oblast B – jádra s přebytkem neutronů
- oblast C – jádra s přebytkem protonů

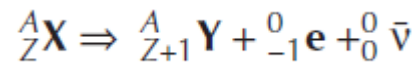
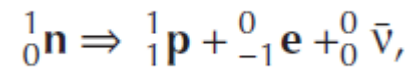


Typy radioaktivity

- Region A – rozpad α

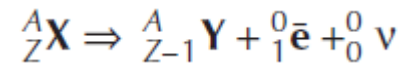
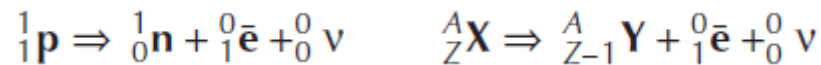


- Region B - rozpad β^-

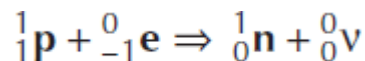


- Region C

- rozpad β^+



- elektronový záchyt (EC) (+ x-rays)

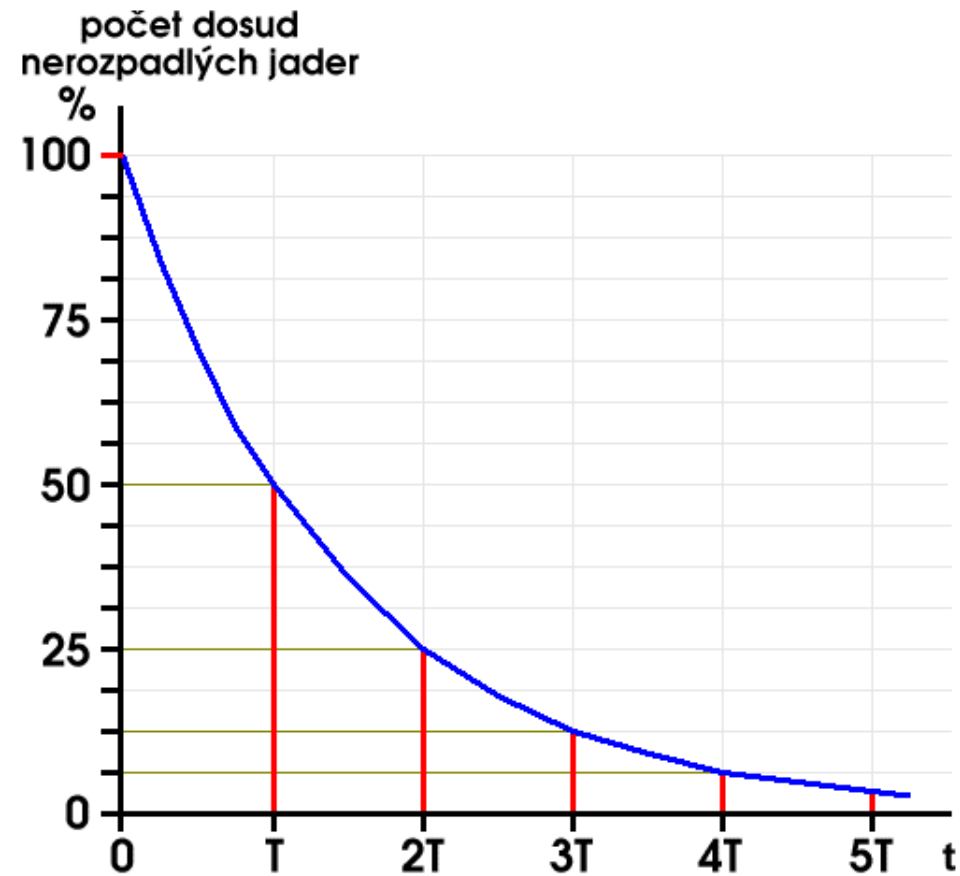


- Excitovaná jádra

- emise γ záření



Radioaktivní rozpad



- *Zákon RA rozpadu:*

$$dN = -N(t)\lambda dt$$

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

$$T = \ln(2)/\lambda = 0,693/\lambda$$

- Aktivita: $A = \lambda N [Bq]$



Rozpadové řady

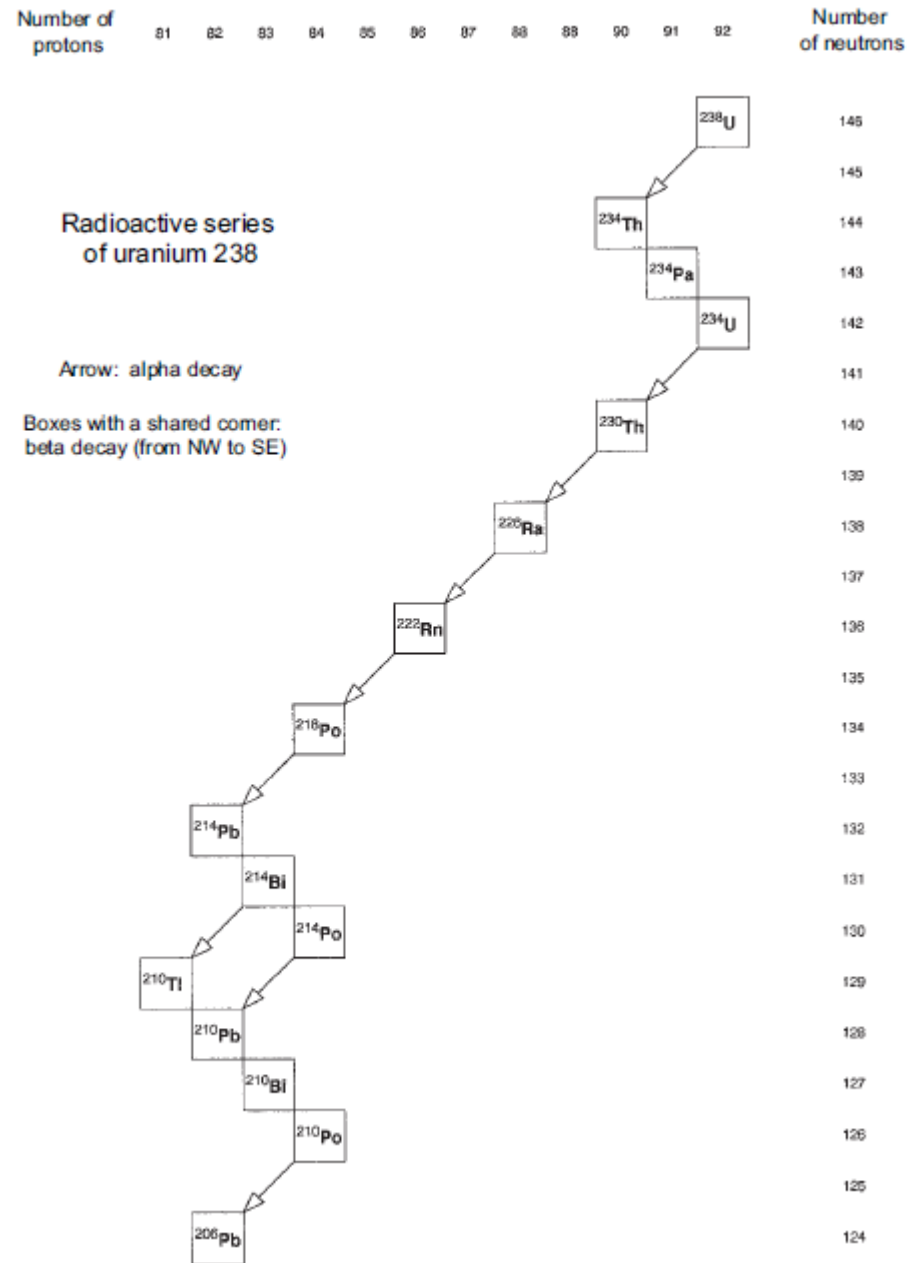
- $X \Rightarrow Y \Rightarrow Z \Rightarrow \dots$

$$\frac{dX}{dt} = -\lambda_X X,$$

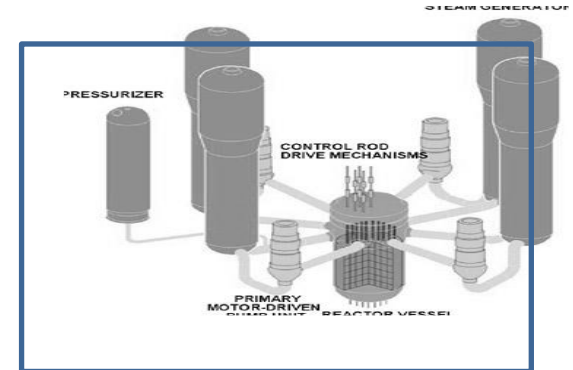
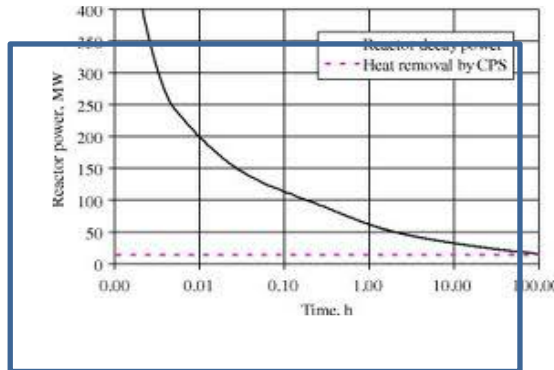
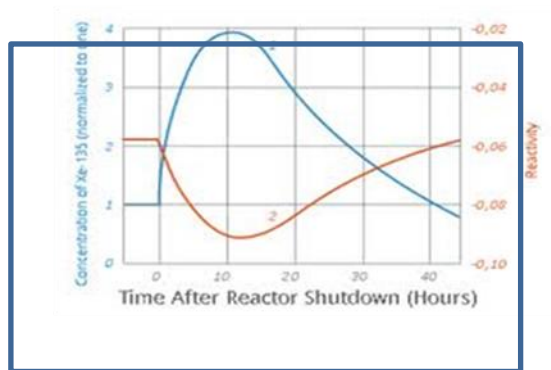
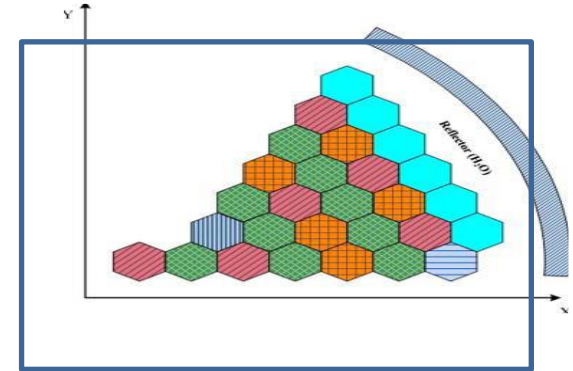
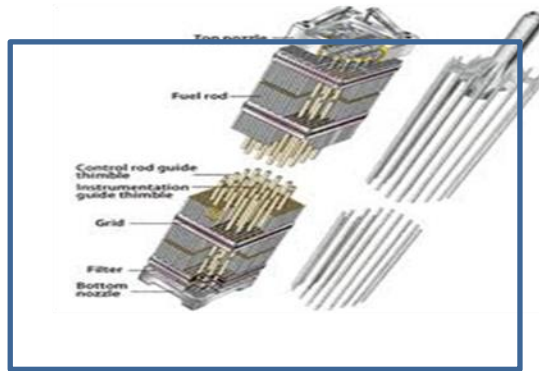
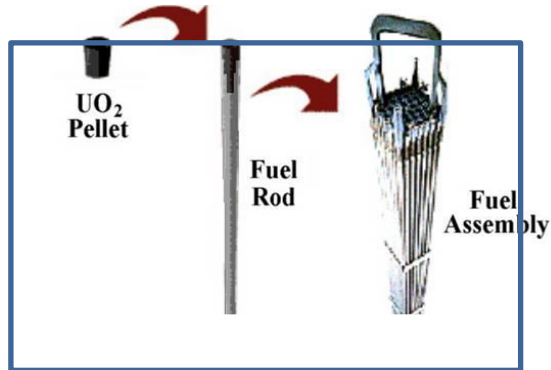
$$\frac{dY}{dt} = +\lambda_X X - \lambda_Y Y,$$

$$\frac{dZ}{dt} = +\lambda_Y Y - \lambda_Z Z$$

- Uranová (^{238}U),
- Neptuniová (^{237}Np),
- Thoriová (^{232}Th),
- Aktiniová (^{235}U)

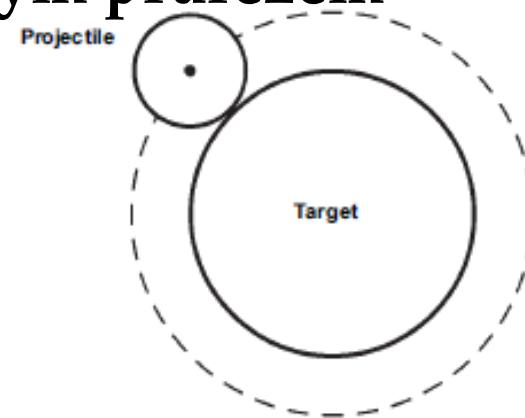


Neutronová fyzika pro jaderné reaktory



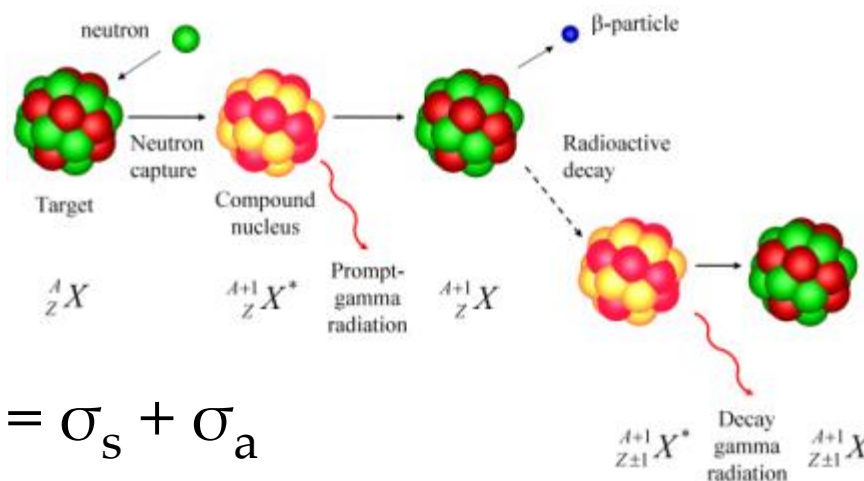
Jaderné reakce

- reakce:
 - spontánní (radioaktivita)
 - indukované ($\mathbf{a + A \Rightarrow B + b}$), nebo $\mathbf{A(a, b)B}$
Př: $4\text{He} + 9\text{Be} \Rightarrow 12\text{C} + 1\text{n}$; $\alpha(9\text{Be}, 12\text{C})\text{n}$
- **zákony zachování** – počet nukleonů, el. náboj, energie, hybnost, spin
- pravděpodobnost interakce dána **účinným průřezem**
 - řádově $10^{-28} \text{ m}^2 = 1 \text{ barn}$
- **mikroskopický účinný průřez** $\sigma [\text{m}^2]$
- **makroskopický účinný průřez** $\Sigma [\text{m}^{-1}]$
- $\Sigma = N\sigma$



Typy neutronových interakcí

- Většina reakcí probíhá přes složené jádro
- Rozptyl
- Absorpce
 - Štěpení
 - Záchyt
- celkový účinný průřez: $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$
- absorpční účinný průřez: $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c$



Souhrn neutronových reakcí

Interakce bez složeného jádra

| | | |
|----------------------------------|---------------------------|------------|
| Potenciálový rozptyl (pružný) | $n + A \Rightarrow n + A$ | vždy možné |
|----------------------------------|---------------------------|------------|

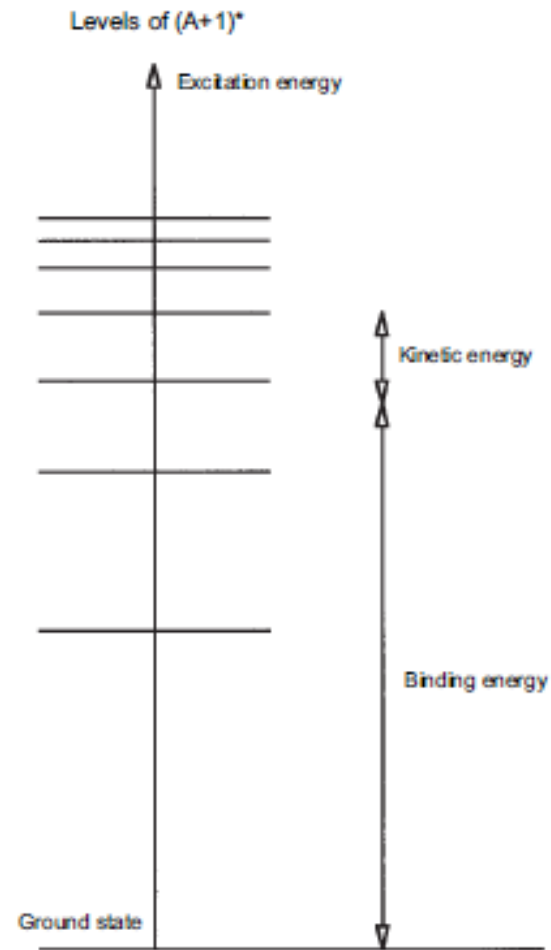
Interakce jdoucí přes složené jádro

| | | |
|----------------------------------|---|---|
| Pružný rozptyl | $n + A \Rightarrow n + A$ | vždy možné |
| Nepružný rozptyl | $n + A \Rightarrow n + A^*$ $A^* \Rightarrow A + \gamma$ | Práh: první en. hladina A |
| Reakce (n,2n) | $n + A \Rightarrow n + n + (A-1)$ | Práh: separační energie neutronu |
| Radiační záchyt | $n + A \Rightarrow \gamma + (A + 1)$ | vždy možné |
| Reakce (neutron, nabitá částice) | $n + A \Rightarrow p + B$ $n + A \Rightarrow \alpha + C$ | obvykle pahové, někdy bezpahové |
| Štěpení | $n + A \Rightarrow \text{FP1} + \text{FP2} + \text{neutrony}$ (průměrně 2 – 3) | těžká jádra; bez prahu pro jádra s lichým N pahové pro jádra se sudým N |



Tvar účinného průřezu

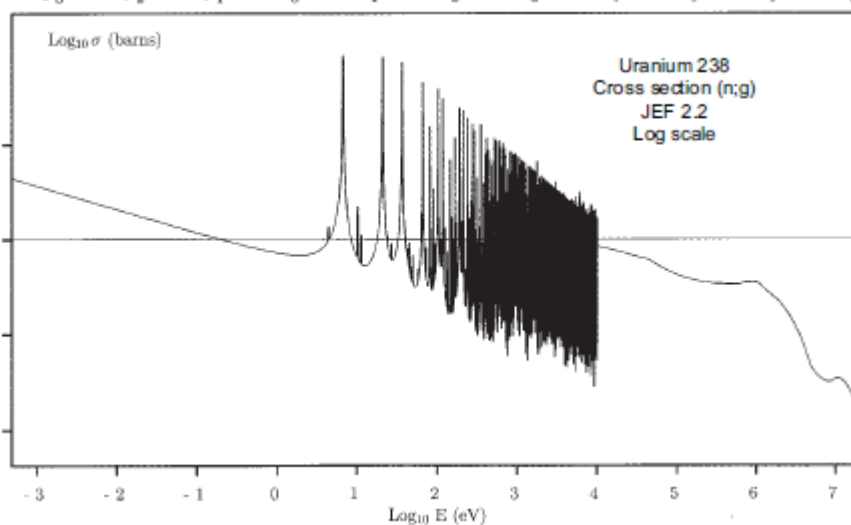
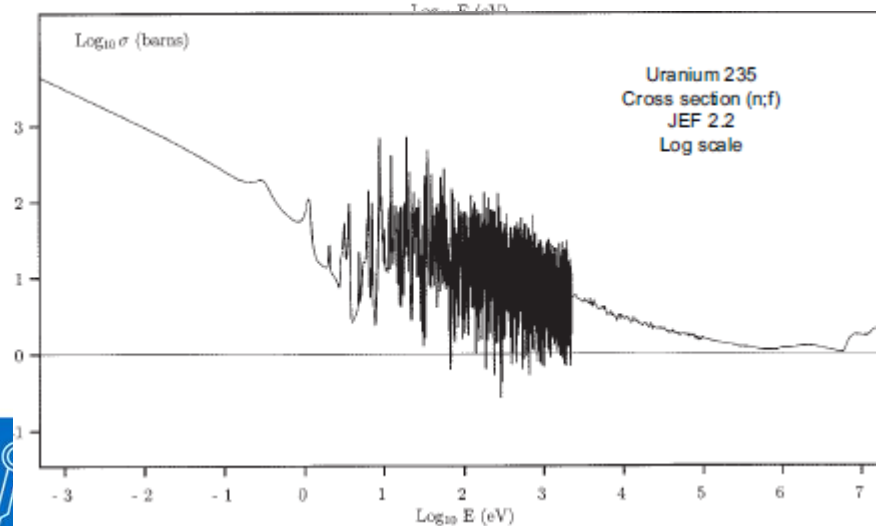
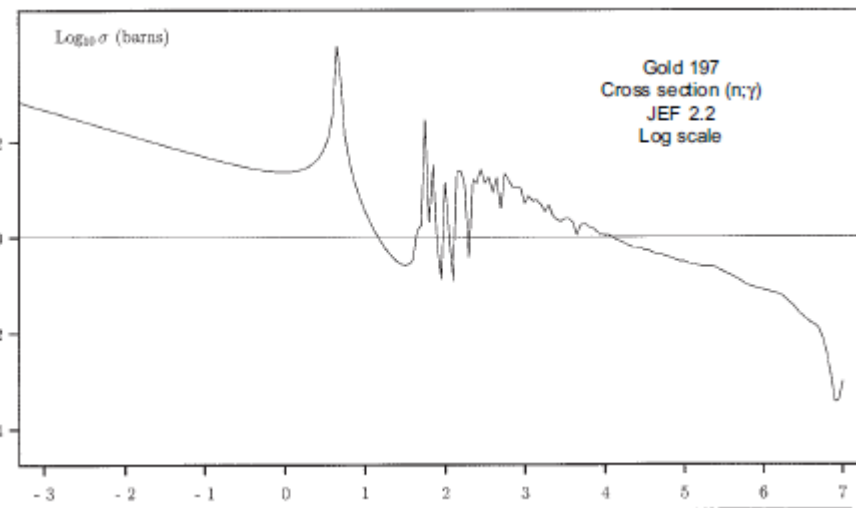
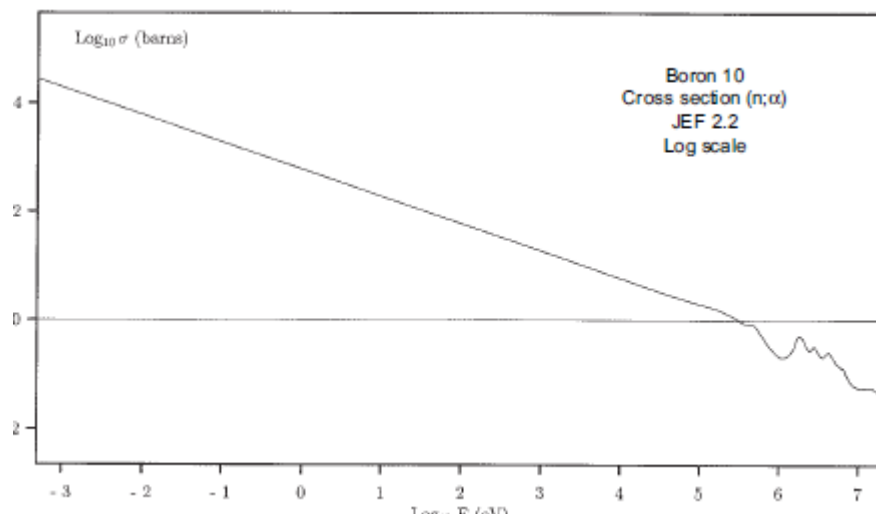
- závislý na terčovém jádře, energii neutronu, typu interakce
 - rozptylový: $\sigma \sim \text{barny}$, přibližně konstantní
 - absorpční : σ výrazně vyšší, silně závislé na terčovém jádře
- nízké energie – závislost $1/v$
- eV – keV – rezonanční oblast
- oblast vysokých energií



Energetické hladiny jádra



Příklady účinných průřezů



Kvantitativní srovnání úč. průřezů

**Absorpční účinné průřezy
vybraných izotopů (v
barnech pro neutrony s
2200m/s)**

| Jádro/prvek | Účinný průřez |
|-------------------------|------------------|
| H (přír. zast.) | 0,332 |
| Deuterium | 0,000506 |
| B-10 | 3 840 |
| Xe-135 | 2 650 000 |
| Sm-149 | 40 500 |
| Gd (přír. zast.) | 48 600 |
| Zr (přír. zast.) | 0,184 |

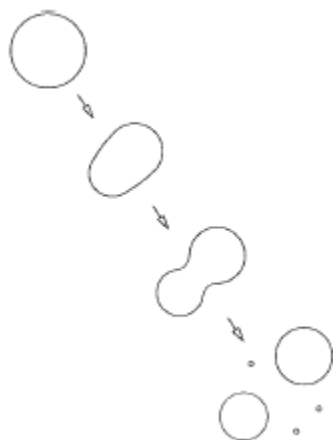
**Účinné průřezy vybraných
izotopů (v barnech pro
neutrony s 2200m/s)**

| Jádro/prvek | Účinný průřez |
|------------------------|---------------|
| U-235: štěpení | 582,6 |
| U-235: absorpce | 98,9 |
| U-238: absorpce | 2,719 |
| Pu-239: štěpení | 747,3 |
| Pu-239: absorpce | 270,4 |

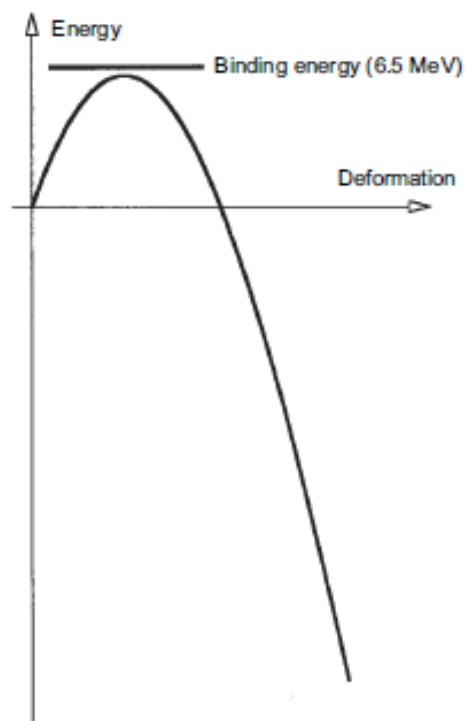


Štěpení těžkých jader

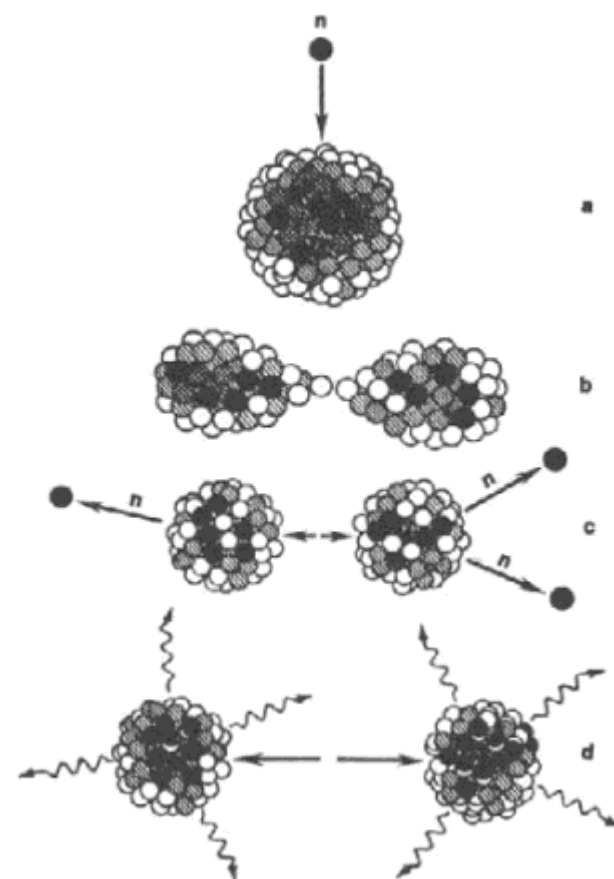
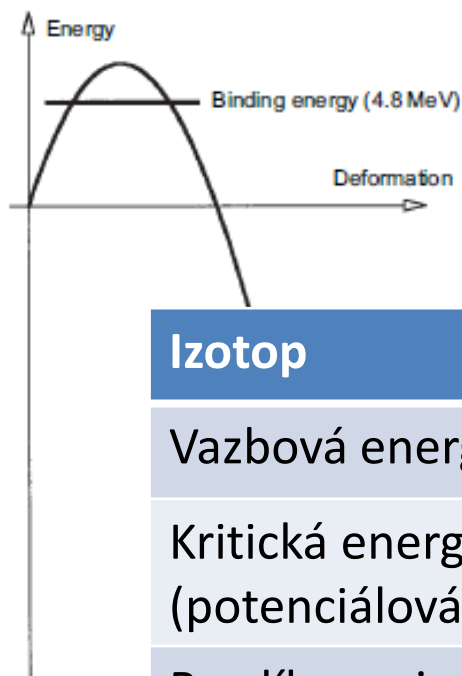
- štěpná a štěpitelná jádra



URANIUM 235



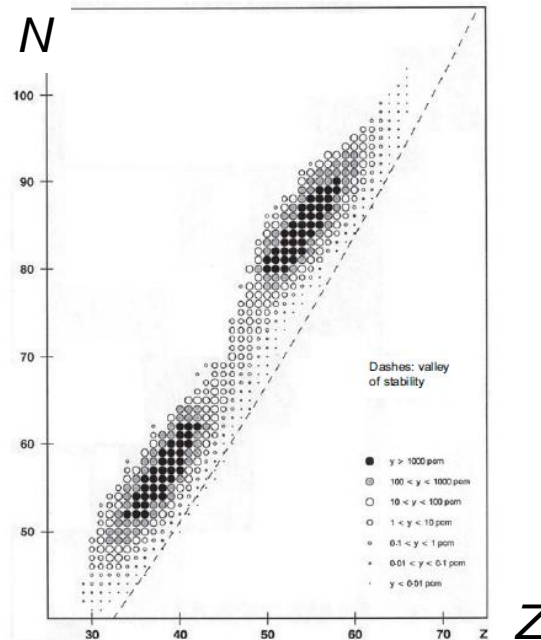
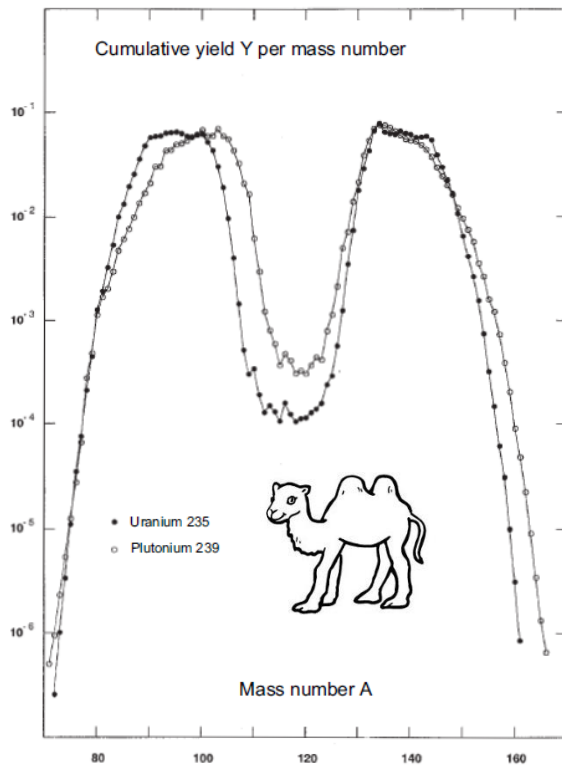
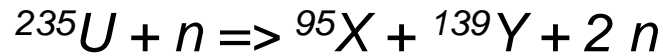
URANIUM 238



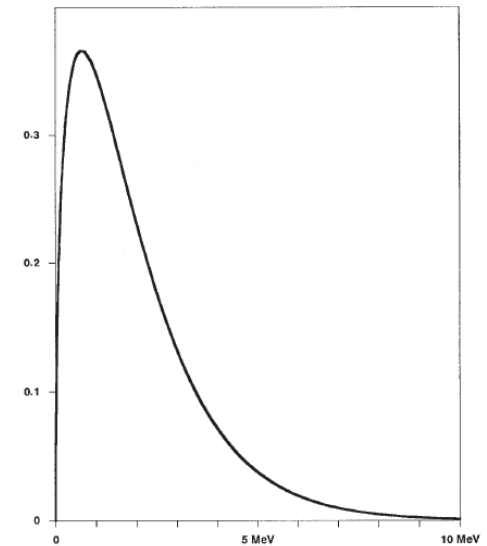
| Izotop | U-235 | U-238 |
|--|-------|-------|
| Vazbová energie | 6,5 | 4,8 |
| Kritická energie pro štěpení (potenciálová bariéra) | 6,1 | 6,6 |
| Rozdíl enegie | +0,4 | -1,8 |

Produkty štěpení

- neutrony
- štěpné produkty



Rozdělení štěpných produktů



Energie neutronů
ze štěpení



Energie ze štěpení

| Energie ze štěpení | Energie (MeV) |
|---------------------------------------|---------------|
| Štěpné produkty | 166,2 |
| Okanžité γ | 8 |
| Neutrony | 4,8 |
| β záření | 7 |
| Antineutrina (z β rozpadu) | 9,6 |
| Zpožděné γ (z β rozpadu) | 7,2 |
| Celkem | 202,8 |

| Energie získatelná ze štěpení | Energie (MeV) |
|-------------------------------|---------------|
| Uvolněná energie | 202,8 |
| Antineutrina | - 9,6 |
| Záchytové γ | + 8,4 |
| Celkem | 201,7 |



Vývin tepla v jaderném reaktoru

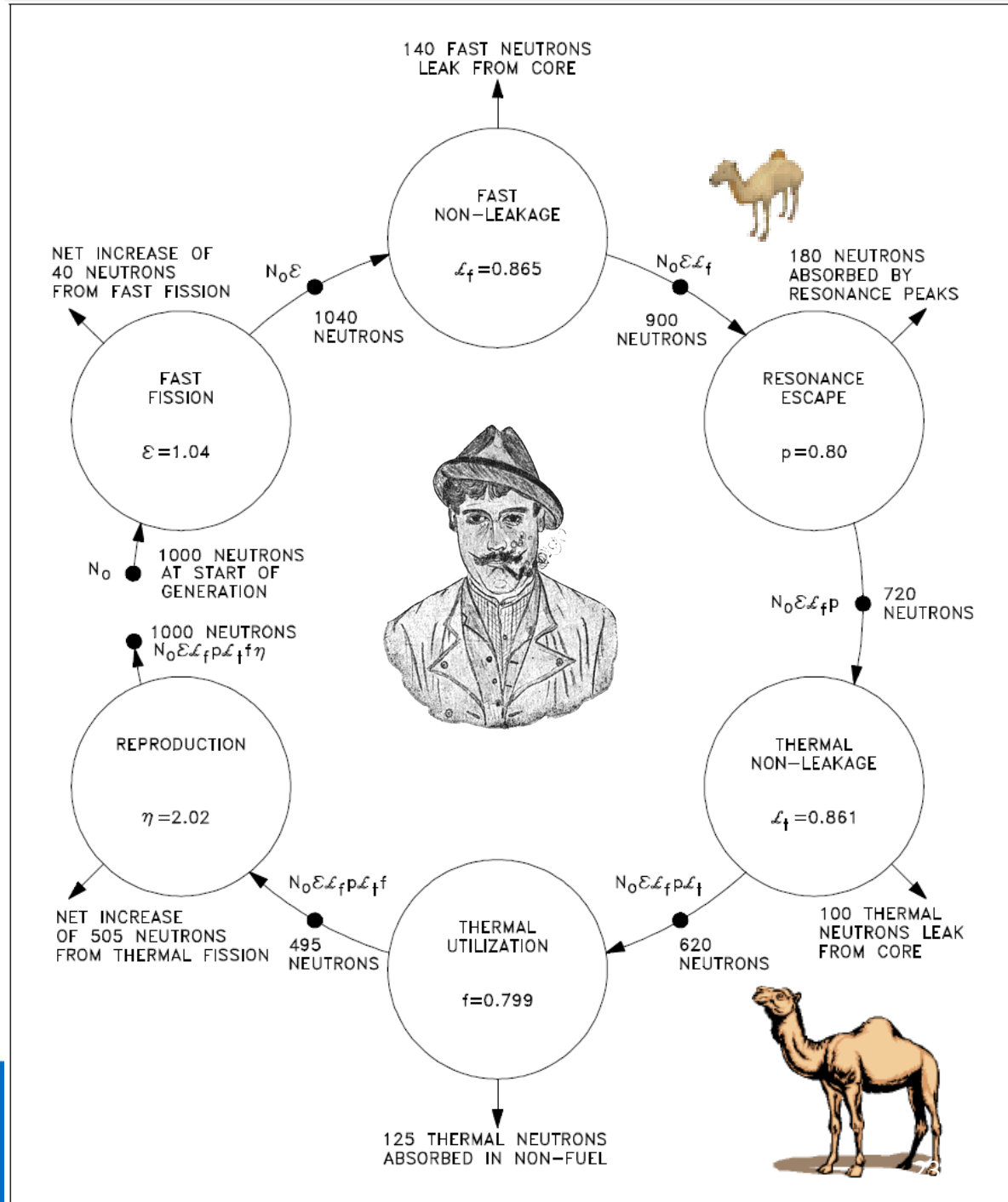
- v palivu $P = E_f \Sigma_f \langle \Phi \rangle V$ ($> 95\%$)
- konstrukční materiály (γ ohřev)
- moderátor (zpomalování neutronů)

- 1 štěpení $\approx 200 \text{ MeV} \approx 30 \text{ pJ}$
- $1 \text{ kg U-235} \approx 2,56 \times 10^{24}$ atomů
- rozštěpením $1 \text{ kg U-235} \approx 1000 \text{ MWd}$
- spotřeba JE o výkonu 1000 MWe
 - $\approx 3 \text{ kg U-235/den}$
 - $\approx 1 \text{ t U-235/rok}$



Bilance neutronů: vzorec čtyř součinitelů

- *koeficient násobení*
 - $k = N_i / N_{i-1}$
- $k_{\infty} = \varepsilon p f \eta$
- $k_{ef} = \varepsilon p f \eta L_f L_t$
- $k_{ef} = 1$ kritický reaktor
- $k_{ef} > 1$ nadkritický reaktor
- $k_{ef} < 1$ podkritický reaktor



Podmínky pro štěpnou řetězovou reakci

- kritické množství (resp. zásoba reaktivity)
 - vztah materiálového a geometrického složení
- k udržení štěpné řetězové reakce je potřeba, aby právě jeden neutron vznikající ze štěpení způsobil další štěpení, a ostatní neutrony byly pohlceny neštěpně



Harry K. Daghlian, Louis Slotin & Demon core



Veličiny popisující chování neutronů v jaderném reaktoru

- Koeficient násobení k_{ef}
- Reaktivita $\rho = \frac{k_{ef}-1}{k_{ef}}$ (% , pcm, \$, β_{ef})
- Hustota neutronů n (n/cm³)
- Hustota toku neutronů $\Phi = nv$ (n/cm²)
- Proud neutronů J (n/cm²)
- Reakční rychlost $R_r = \Sigma_r \Phi$ (např. počet štěpení/s)



Transportní (Boltzmanova) rovnice

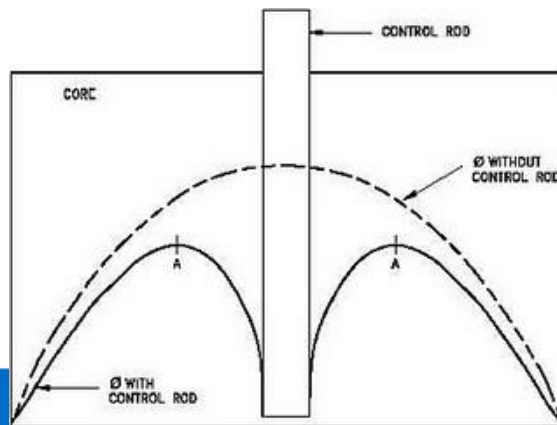
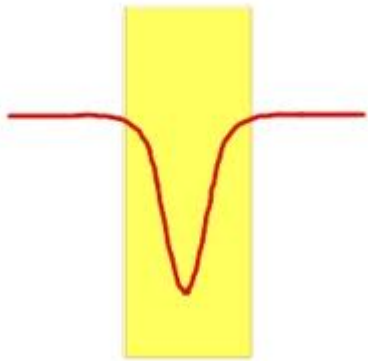
- Přesný popis transportu neutronů
- 7 proměnných (\mathbf{p} , E , $\mathbf{\Omega}$, t)
- transport, interakce, zdroje

$$\frac{1}{v(E)} \frac{\partial \varphi(\mathbf{r}, E, \hat{\mathbf{\Omega}}, t)}{\partial t} + \hat{\mathbf{\Omega}} \cdot \nabla \varphi(\mathbf{r}, E, \hat{\mathbf{\Omega}}, t) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E, t) \varphi(\mathbf{r}, E, \hat{\mathbf{\Omega}}, t) = \int_{4\pi} d\Omega' \int_0^\infty dE' \Sigma_s(\mathbf{r}, E' \rightarrow E, \hat{\mathbf{\Omega}}' \rightarrow \hat{\mathbf{\Omega}}, t) \varphi(\mathbf{r}, E', \hat{\mathbf{\Omega}}', t) + s(\mathbf{r}, E, \hat{\mathbf{\Omega}}, t)$$



Difúzní rovnice

- Zjednodušený popis rozložení neutronů
 - pohyb neutronů proti směru gradientu
- bilance úniku, absorpce a zdrojů neutronů
- $D\Delta\Phi - \Sigma_a\Phi + S = dN/vdt$

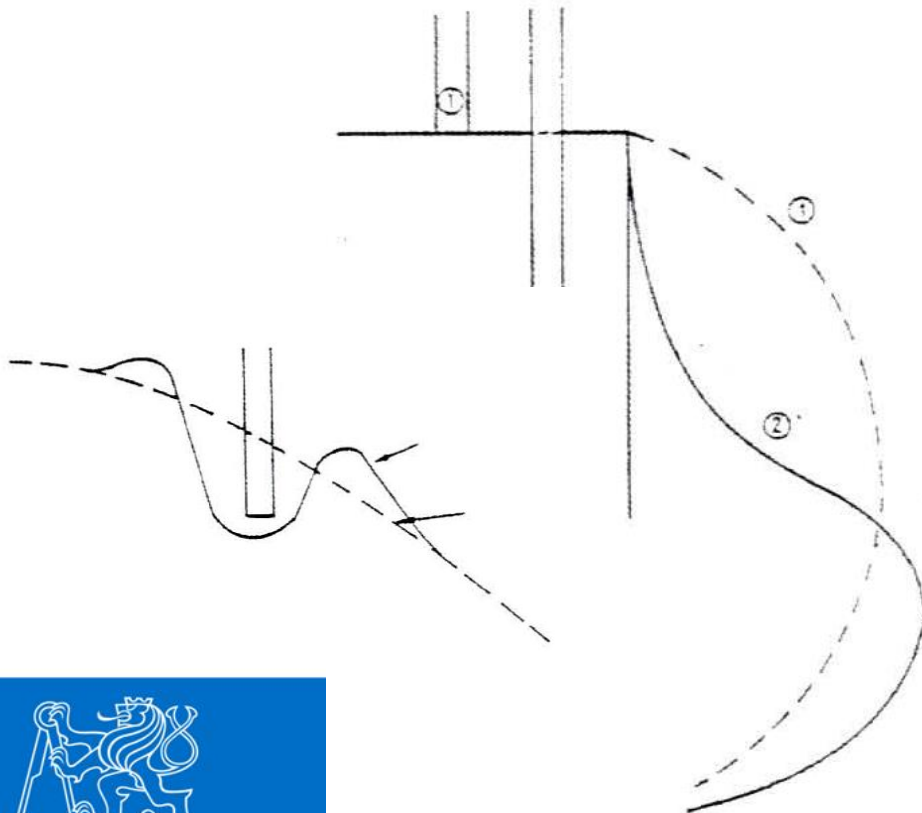


- Aproximace:
 - jednogrupová
 - všechny neutrony vznikají a zanikají při stejné energii
 - dvougrupová
 - rozdělení na tepelné a rychlé neutrony
 - více-grupová

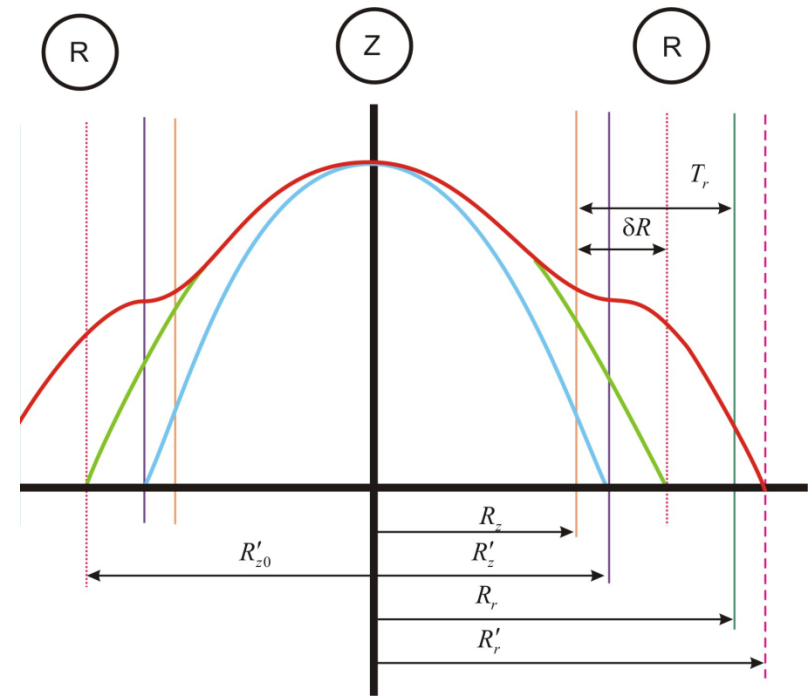


Vliv regulačních tyčí a reflektoru na rozložení hustoty toku neutronů v AZ

Regulační tyče



Reflektor



Zpomalování neutronů

- pružný rozptyl na moderátoru
- maximální relativní ztráta energie při jedné

srážce:
$$\frac{4A}{(A+1)^2}$$

- Letargie $u = \ln E_{\text{ref}}/E$
- Průměrná logaritmická ztráta energie $\xi (= \langle \ln(E_1/E_2) \rangle)$
- Zpomalovací schopnost $\xi \Sigma_s$
- Koeficient zpomalení $\xi \Sigma_s / \Sigma_a$

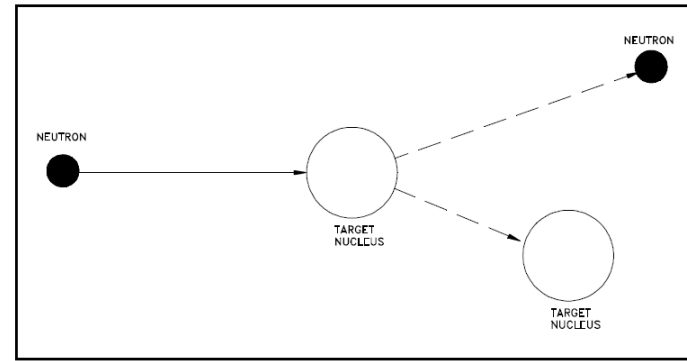


Figure 16 Elastic Scattering



Zpomalování neutronů

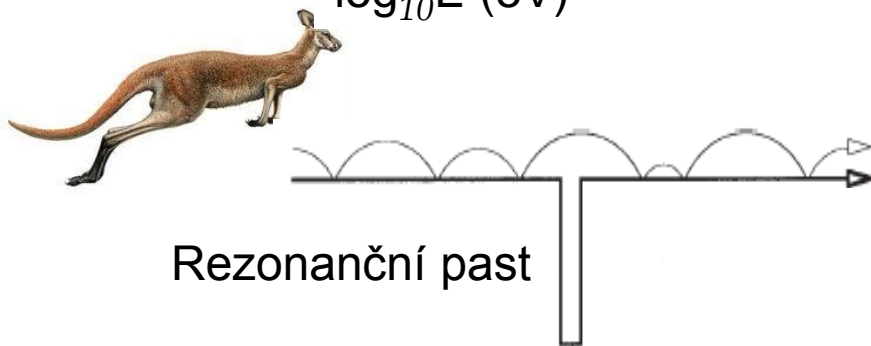
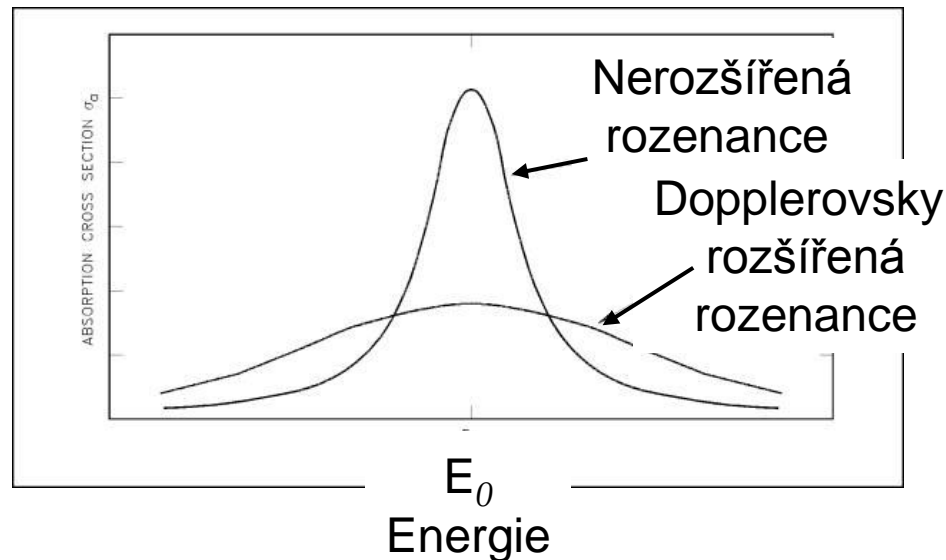
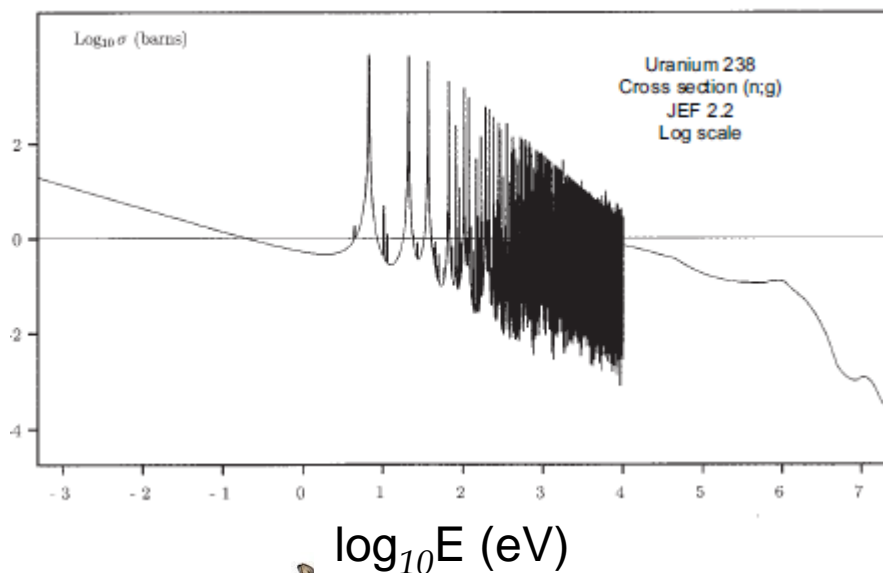
- Porovnání moderačních vlastností vybraných izotopů/materiálů

| Nuklid | A | ξ | n | Σ_s | Σ_a |
|--------|-----|--------|------|------------|------------|
| H | 1 | 1 | 15 | 20,4 | 0,333 |
| D | 2 | 0,725 | 20 | 3,4 | 0,00051 |
| C | 12 | 0,158 | 92 | 4,74 | 0,00337 |
| U | 236 | 0,0084 | 1717 | | |

| Materiál | $\xi\Sigma_s$ | $\xi\Sigma_s/\Sigma_a$ |
|------------|---------------|------------------------|
| Voda | 135 | 71 |
| Těžká voda | 17,6 | 5670 |
| Grafit | 6 | 192 |



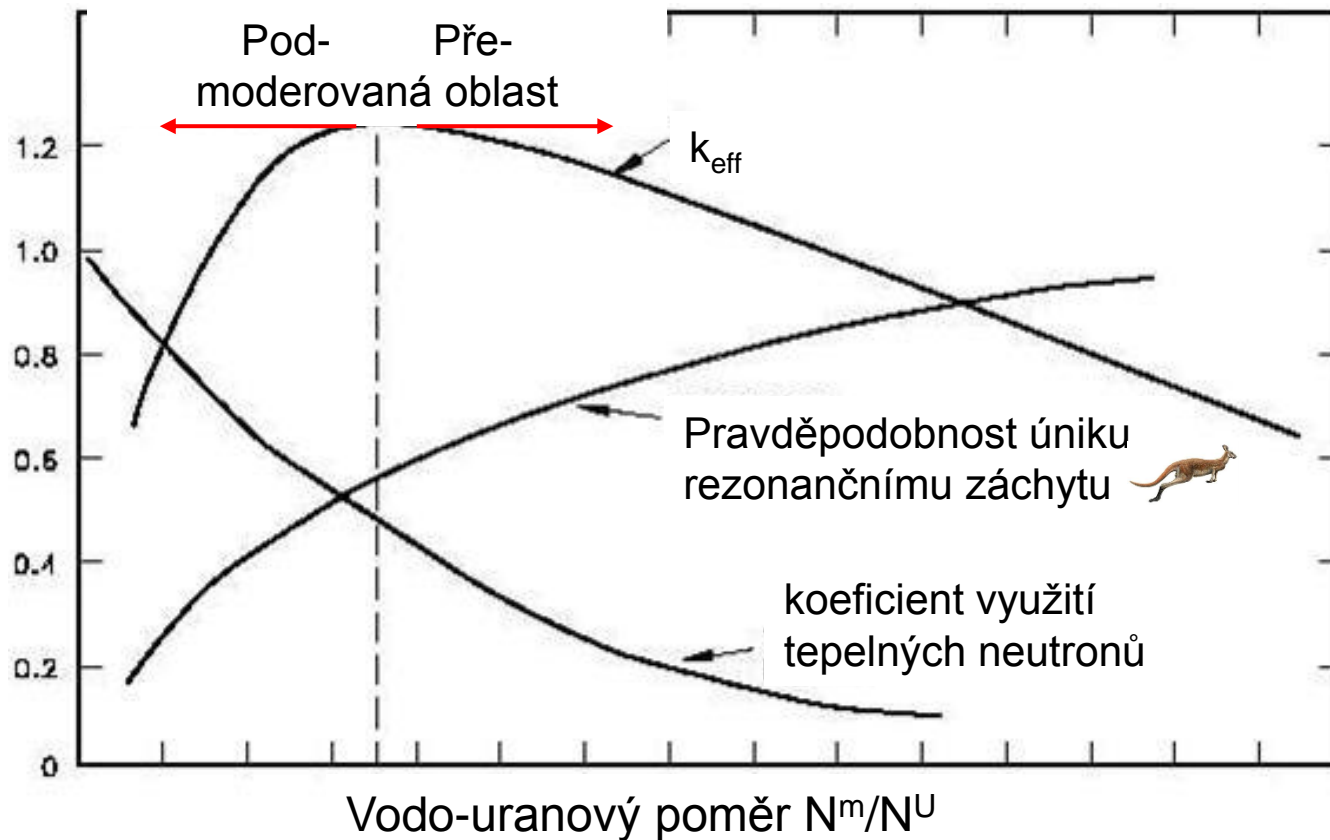
Rezonanční absorpce a Dopplerův efekt



- S rostoucí teplotou
 - zachovává se plocha pod křivkou
 - roste rezonanční absorpce
 - záporná zpětná vazba na U-238



Optimální moderace a vodouranový poměr

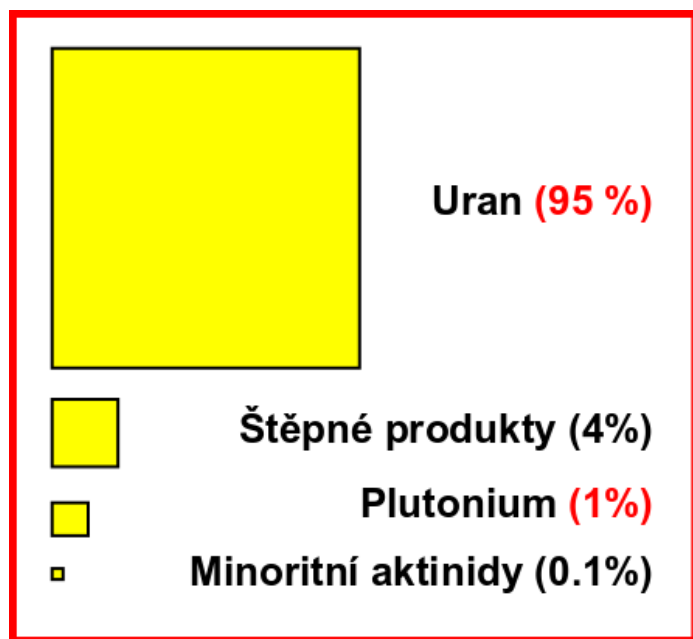


- závislost na změně teploty (var)
- vs. přidavek bóru



Vyhořívání paliva v jaderném reaktoru

- štěpné produkty
- transurany
- aktivační produkty



Složení vyhořelého paliva

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 H | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He |
| 3 Li | 4 Be | | | | | | | | | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne | | |
| 11 Na | 12 Mg | | | | | | | | | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 Ar | | |
| 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr |
| 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb | 52 Te | 53 I | 54 Xe |
| 55 Cs | 56 Ba | 57 Ln | 58 Hf | 59 Ta | 60 W | 61 Re | 62 Os | 63 Ir | 64 Pt | 65 Au | 66 Hg | 67 Tl | 68 Pb | 69 Bi | 70 Po | 71 At | 72 Rn |
| 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac | 90 Rf | 91 Db | 92 Sg | 93 Bh | 94 Hs | 95 Mt | 96 Uun | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| LANTHANIDES | 87 La | 89 Ce | 90 Pr | 91 Nd | 92 Pm | 93 Sm | 94 Eu | 96 Gd | 97 Tb | 98 Dy | 101 Ho | 102 Er | 104 Tm | 105 Yb | 106 Lu |
| ACTINIDES | 88 Ac | 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 100 Es | 101 Fm | 102 Md | 104 No | 105 Lr |

TRANSURANICS

FISSION PRODUCTS

ACTIVATION PRODUCT

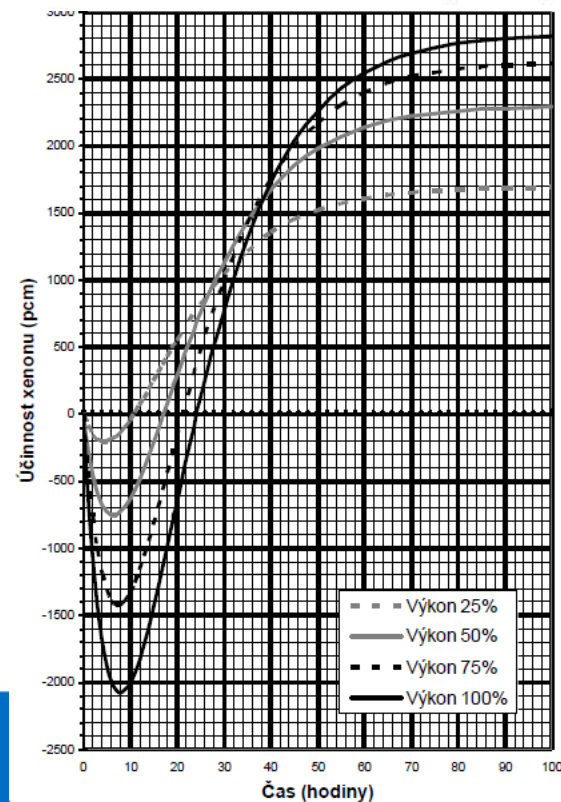
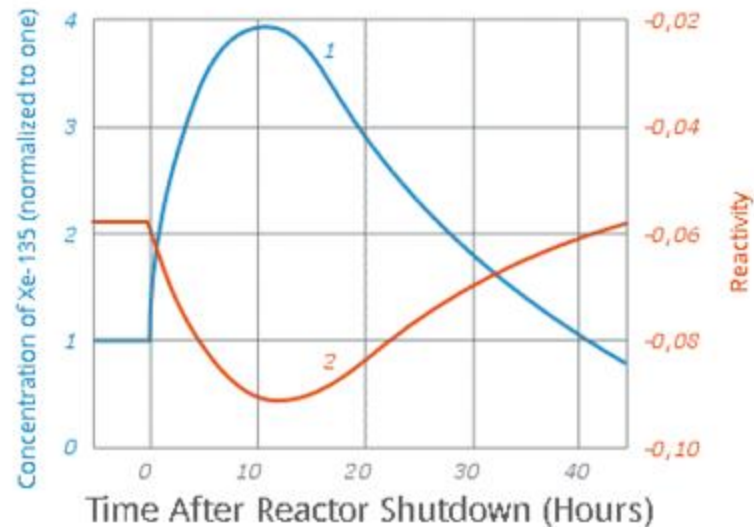
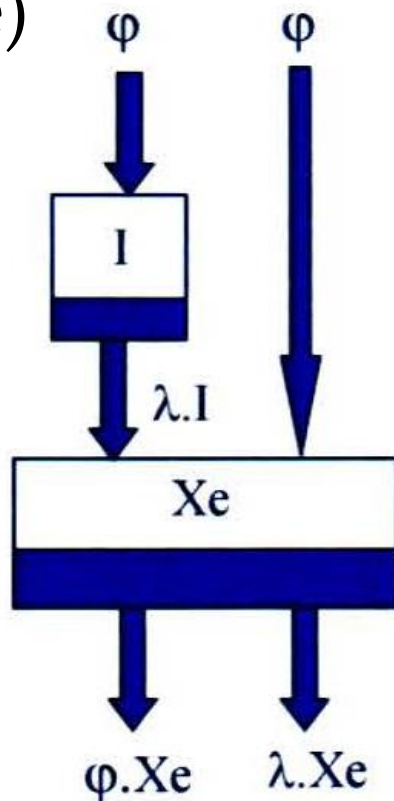
REASON AND ACTIVATION PRODUCTS



Střednědobá kinetika

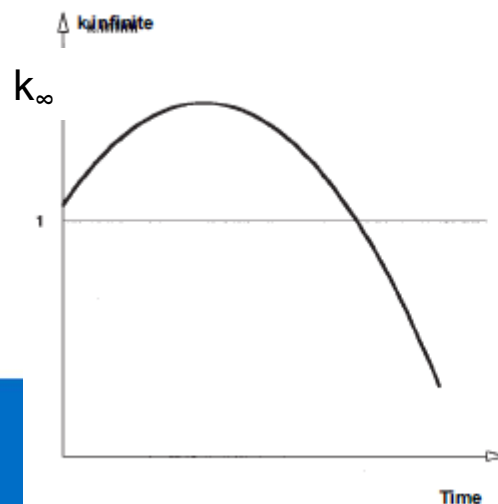
- vliv Xe (iodová jáma, xenonová otrava, xenonové oscilace)
- samariová otrava

Xe-135: $2.5\text{E}6$ barn
Sm-149: $4.1\text{E}4$ barn

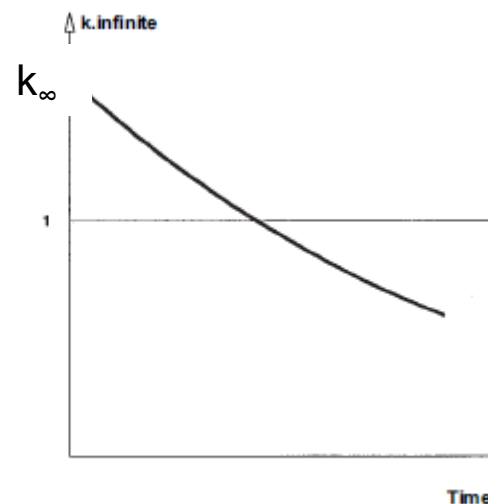


Vyhořívání

- Jednotky vyhoření:
 - vyhoření **MWd/kg** (GWd/t)
 - **zlomek vyhoření** (počet štěpení k počátečnímu počtu těžkých jader)
 - 1% zlomku vyhoření $\sim 10\,000$ MWd/t.
- štěpné, množivé nuklidy
- vyhořívající absorbátory



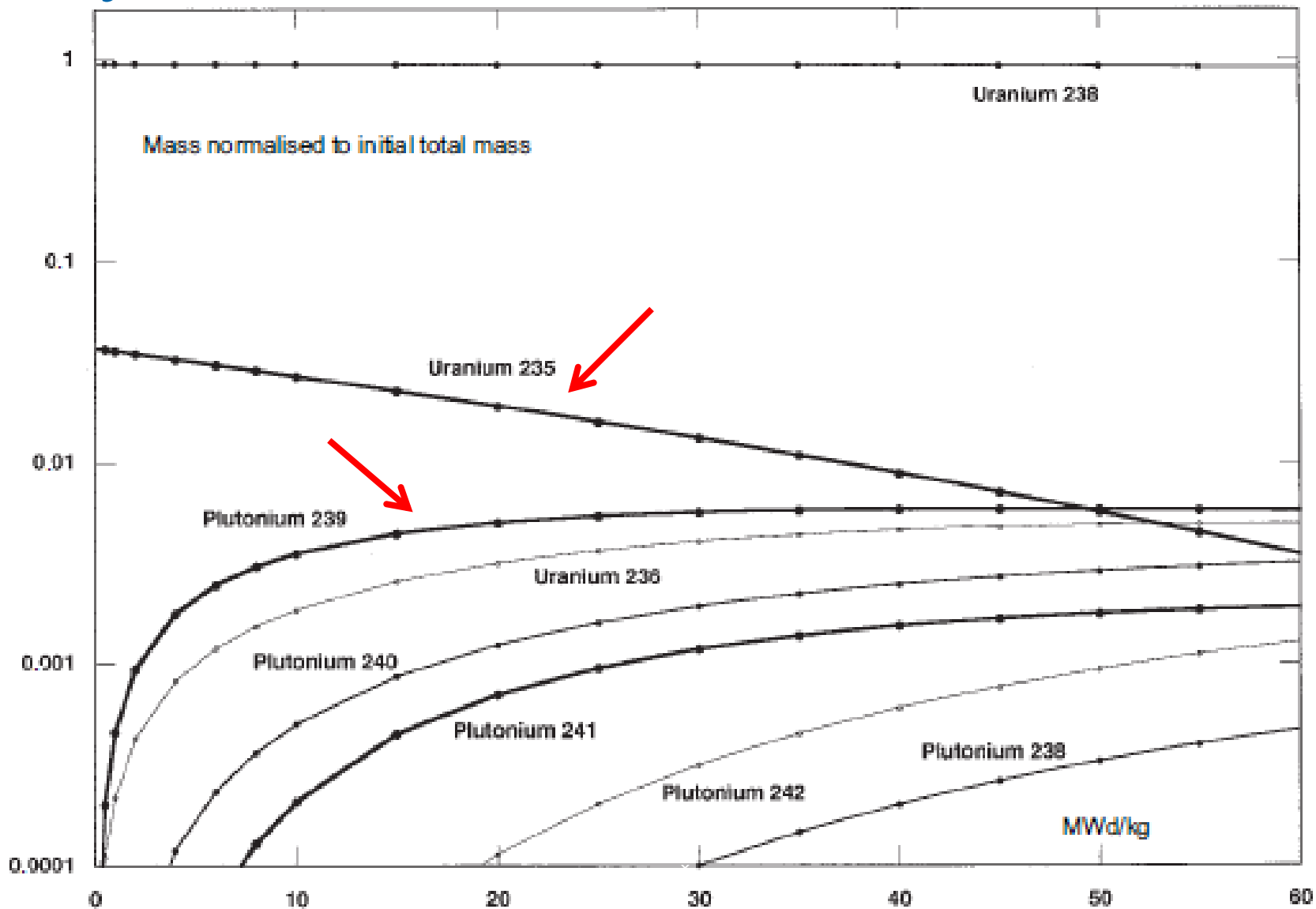
Natural uranium fuel



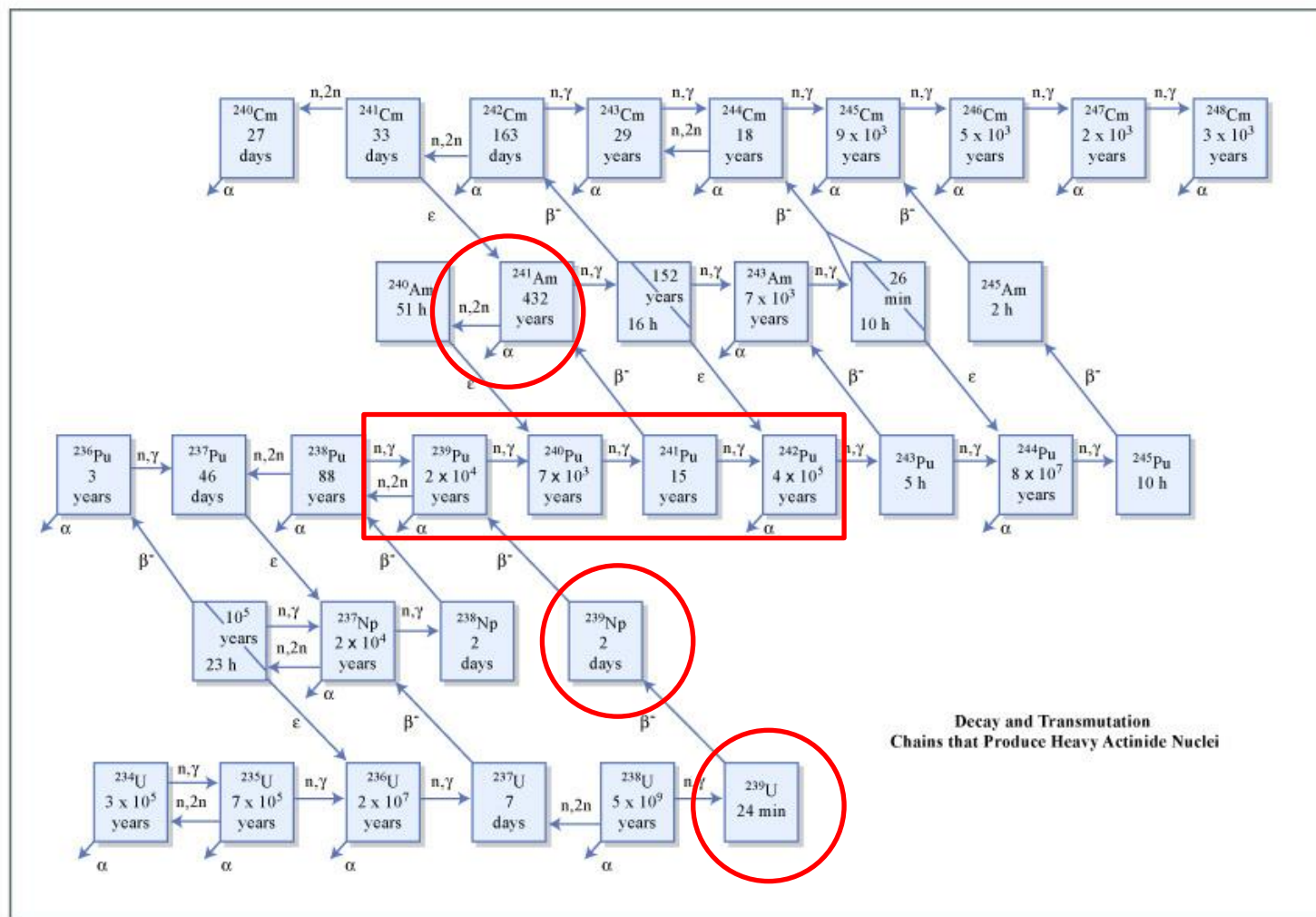
Enriched uranium fuel



Vývoj izotopů U a Pu v průběhu vyhořívání



Tvorba transuranů při vyhořívání



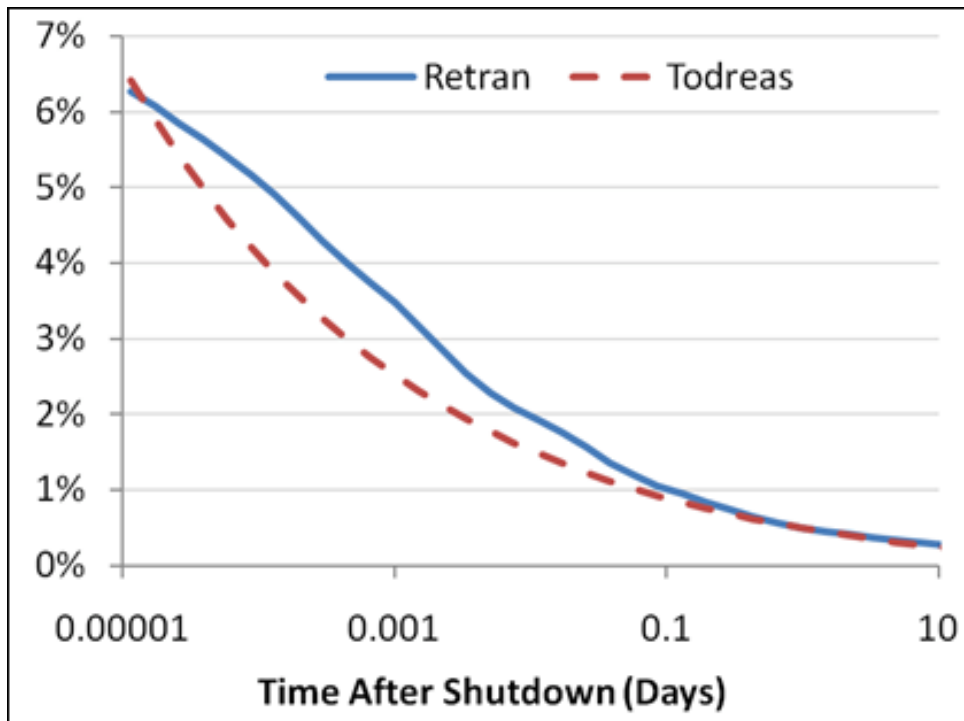
Štěpné produkty

- „zastruskování“ reaktoru
- vliv na středně a dlouhodobou kinetiku
- významné štěpné produkty – Xe-135, Sm-149,...
- pseudostrusky
 - grupování do skupin u málo významných štěpných produktů (z hlediska vlivu na reaktivitu)

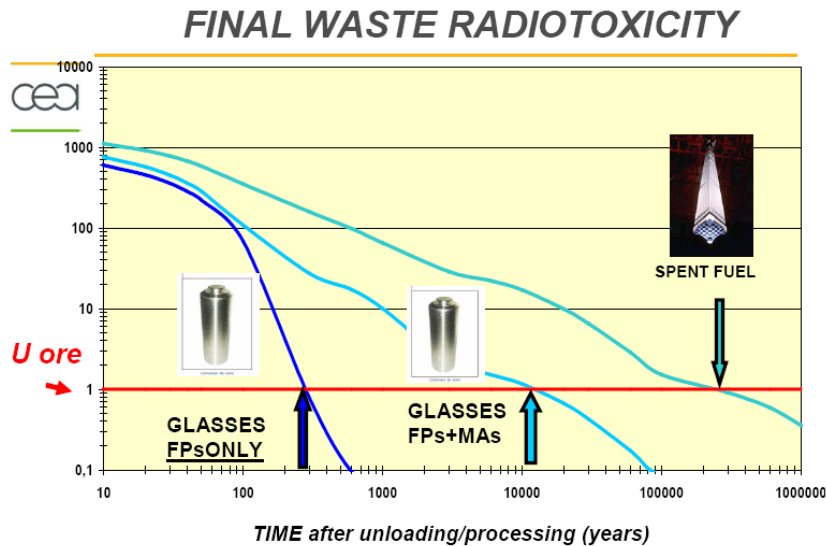


Vyhořelé jaderné palivo – krátkodobé hledisko

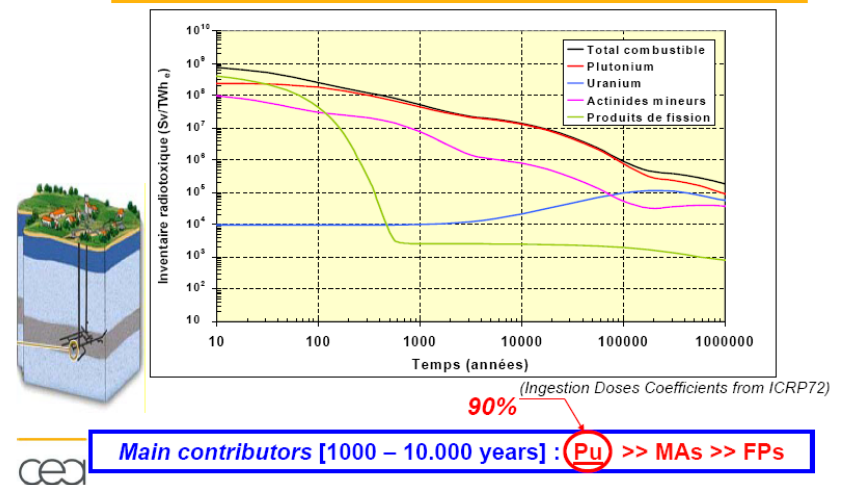
- Zbytkový vývin tepla po odstavení reaktoru



Vyhořelé jaderné palivo – dlouhodobé hledisko



Dlouhodobá radiotoxicita vyhořelého paliva



Děkuji za pozornost



Zdroje neutronů

- Spontánní štěpení (Cf-252)
- Indukované reakce – α, n zdroje (AmBe); γ, n zdroje (Sn-124)
- Fúzní reakce ($D+T \Rightarrow \alpha + n$)
- Spalační reakce
- Štepná reakce

