

# Trocha (víc) historie (snad) nikoho nezabije...

- 1896: objev radioaktivity (H.A.Becquerel)
- 1932: objeveny neutrony
- 1938: O. Hahn vysvětlil „uranovou anomálii“, kdy při ozařování n nevzniká jeden těžší isotop, ale hned několik lehčích
- 2. 12. 1942: 1. jaderný reaktor – Chicago
- 16. 7. 1945: 1. využití štěpné reakce – bomba – Trinity desert v Novém Mexiku
- srpen 1945: uranová bomba – Hiroshima  
plutoniová bomba - Nagasaki
- 1954: 1. jaderná elektrárna – Obninsk
- 26. 4. 1986: Černobyl (4. blok)
- dodnes už více než 6000 reaktorů

<http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/prednasky/>

Jaderná reakce je jaderná přeměna vyvolaná vzájemným působením (srážkou) s jinými jádry nebo částicemi.

Každá jaderná reakce musí splňovat **zákony zachování**.

Jde o experimentálně ověřené obecné vztahy odrážející symetrie hmoty, prostoru a času.

Jde zejména o:

1. zákon zachování energie;

2. zákon zachování hybnosti;

ZZE a zákon zachování hmotnosti jsou podle teorie relativity propojeny v jeden zákon: zákon zachování relativistické energie.

3. zákon zachování elektrického náboje;

4. zákon zachování počtu nukleonů;

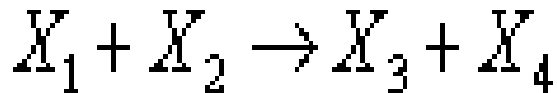
Dalšími zákony jsou např. zákon zachování počtu [baryonů](#), [leptonů](#), [zákon zachování parity](#), ...

To jsou zákony, které v makrosvětě nemají příliš dobré analogie.

Z hlediska energetické bilance mohou být jaderné reakce:

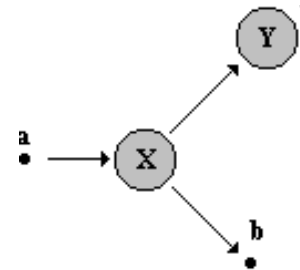
1. endoenergetické reakce - energii je nutno reakci dodat z okolí;
2. exoenergetické reakce - energie se při reakci uvolňuje.

Z praktického hlediska je zájem zejména o exoenergetické reakce.



$$\Delta m = m(X_3) + m(X_4) - [m(X_1) + m(X_2)]$$

$$Q = -931,5 \cdot \Delta m \quad \text{MeV}$$

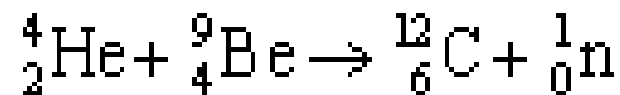


**1 atomová hmotnostní jednotka =  $1,661 \times 10^{-27}$  kilogramů**

1. jaderná reakce vyvolaná uměle byla uskutečněna Rutherfordem v r. 1919 při ostřelování dusíku částicemi  $\alpha$ :

Povedlo se tak uskutečnit sen alchymistů: přeměnu jednoho prvku v druhý.

Umělé jaderné reakce se z počátku prováděly pomocí částic  $\alpha$  získávaných z přírodních radionuklidů. Tímto způsobem byl např. v roce 1932 učiněn objev neutronu:

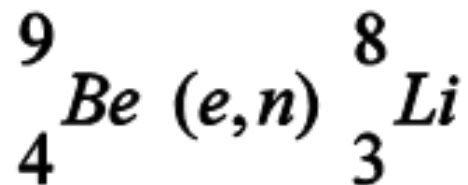


Pomocí neutronů byla uskutečněna řada JR a získány nové radionuklidy  
Neutrony nemají elektrický náboj – těžko je registrovat



V neutronových detektorech se využívá reakce:  $\nearrow$  .

Dopad. neutron uvolňuje z jader boru částice  $\alpha$ , ty lze registrovat Geigerovým - Müllerovým počítačem.



# Účinný průřez

**Pravděpodobnost toho, zda dojde při dopadu letící částice na jádro k reakci vyjadřujeme pomocí tzv. účinného srážkového průřezu. Ten jakoby vyjadřuje velikost plochy terče nastavené letící částici.**

Účinný průřez pro určitou jadernou reakci je efektivní plocha jádra takové velikosti, že jestliže do ní směřuje odstřelující částice, dojde k jaderné reakci.

Jednotkou účinného průřezu je

[u]=barn, přičemž platí  $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$ .

Účinný průřez závisí na energii odstřelující částice, proto jeho hodnota může být menší, rovná nebo i větší než je geometrický průřez  $S$  jádra se kterým interaguje. Odstřelujeme-li celou soustavu jader (např. vzorek pevné látky), - terčík z  $N$  částic dopadajících na povrch terčíku  $S$  v oblasti o tloušťce  $dx$  ubude interakcí -  $dN$  částic. Velikost této veličiny vyplývá zřejmě z rovnice

$$-\frac{dN}{N} = \frac{dN^* \sigma}{S} = \frac{nS\sigma dx}{S} = n\sigma dx,$$

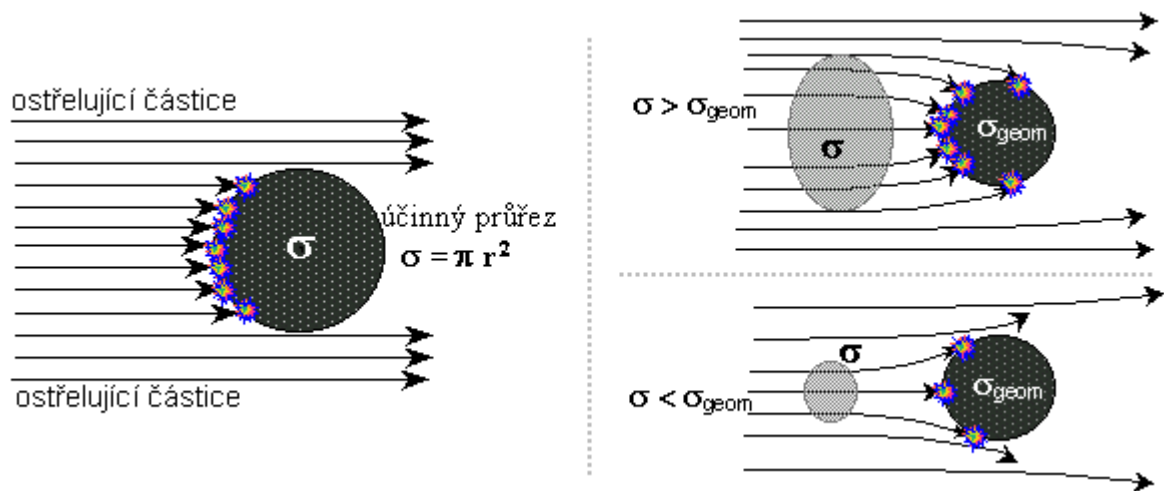
Účinný průřez může, ale nemusí, souviset s "geometrickým průměrem"

terčového jádra  $s_{geom}$ , či jeho "geometrickým průřezem"

$s_{geom} = \pi r_{geom}^2$ .

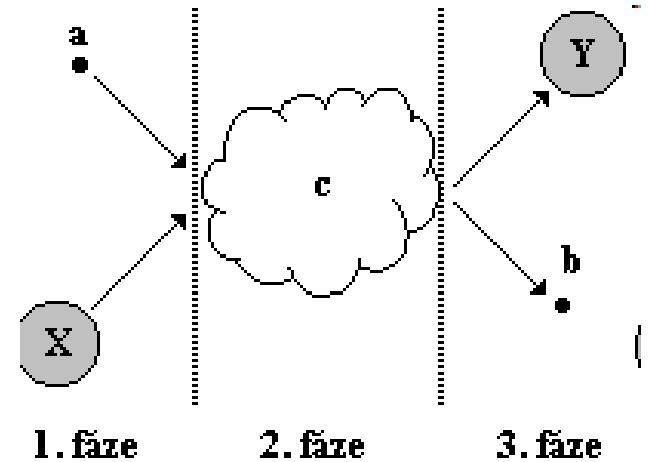
Pro "přitahující se" částice (např. neutrony) je  $s > s_{geom}$ ,

pro odpuzující se částice (např. protony) je  $s < s_{geom}$



J.Reakce probíhá ve 3 etapách (viz obr.):

1. setkání částice  $a$  a jádra  $X$ ;
2. vznik přechodného útvaru  $c$ ;
3. vznik jádra  $Y$  a uvolnění částice  $b$ .



Složené jádro  $c$  se nachází v jistém energet.stavu.

Po jeho rozpadu vzniká jádro  $Y$  v určitém energet.stavu a část energie odnáší částice  $b$ .

Vzhledem k tomu, že částice  $b$  nemůže odnést libovolnou energii, je její spektrum čárové.

Nejpravděpodobněji rozpad dopadne tak, že částice  $b$  odnáší největší možnou energii a jádro  $Y$  vzniká v základním stavu.

Jádro  $c$  zapomíná historii svého vzniku.

# Umělé jaderné reakce

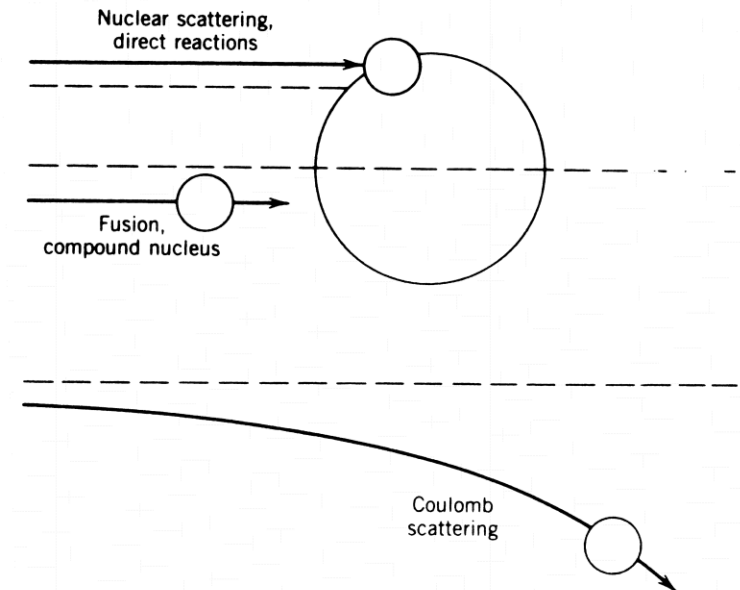
jiné reakce než přirozené jaderné rozpady

## Dělení podle mechanismu reakce

- přímé jaderné reakce
- reakce přes složené jádro - probíhá ve dvou fázích:
  - vznik složeného jádra
  - přechod do nového stavu
    - závislé na vlastnostech terčičku a projektilu, energii nalétávající částice

## Dělení podle vznikajících částic

- pružný rozptyl
- nepružný rozptyl
- štěpení (fission)
- tříštění (spallation)
- transmutace
  - fúze (fusion)
  - fotojaderné reakce





# Energetická závislost jaderných reakcí

- Vůbec nejsnadněji lze jaderné reakce vyvolat **neutrony**, ty nemají náboj, nejsou jádru odpuzovány a proto většinou **ochotně vstupují do jader** i tehdy, když jsou pomalé. Nejjednodušší neutronovou reakcí je prostý **záchyt neutronu jádrem X**.

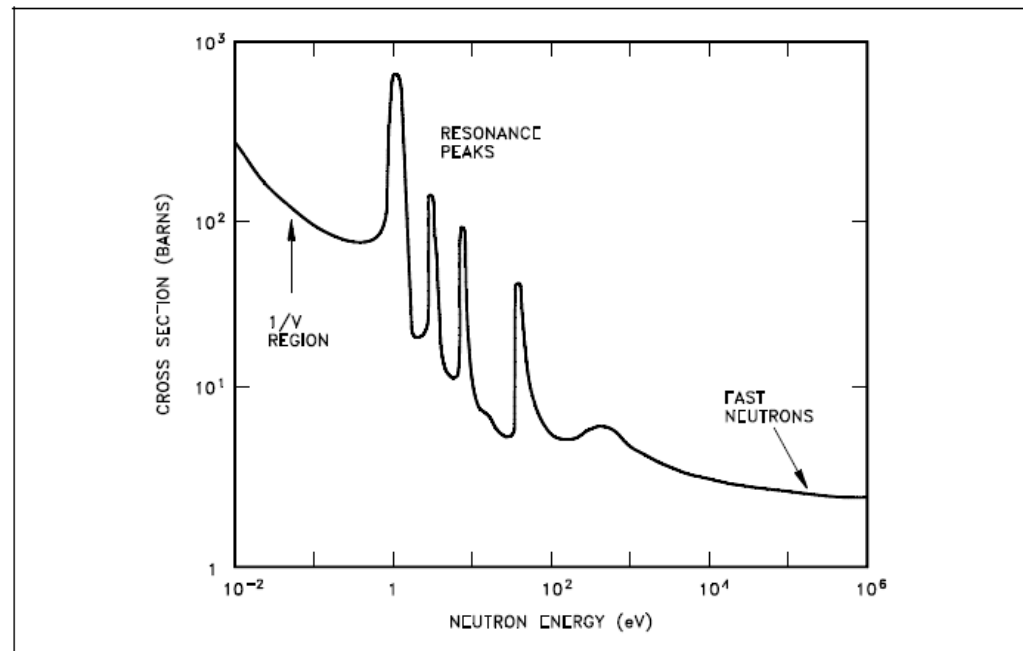


Figure 1 Typical Neutron Absorption Cross Section vs. Neutron Energy

## Druhy jaderných reakcí

JR se obv. **klasifikují** podle příčiny svého vzniku, tj. jakou **částicí** byly vyvolány:

- Neutrony

nejsnadněji lze jimi vyvola jaderné reakce  $X(n, g)Y$  ,

mohou vyvolat i reakce spojené s vyzářením částic,  $(n, p)$ ,  $(n, d)$ ,  $(n, \alpha)$ , popř. i vyzářením více částic, třeba  $(n, 2p)$

U těžkých jader v oblasti uranů a transuranů vyvolávají neutrony specifické reakce štěpení jader

- Protony

K tomu, aby proton  $p^+$  vnikl do jádra a mohl tam vyvolat jadernou reakci, musí být urychlen keV , Výsledné jádro Y často vykazuje  $\beta^+$ -radioaktivitu

Při nejvyšších energiích protonů (stovky MeV a více) dochází k tříštivým reakcím, při nichž je jádro víceméně "rozbito"

- Částice alfa

vyvolávají při ostřelování terčíkových jader nejčastěji reakce typu  $(\alpha, n)$  a  $(\alpha, p)$

Těžší jádra,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{N}$  je třeba pro uskutečnění jaderné reakce urychlit na značně vysoké kinetické energie  $\gg 100\text{MeV}$  --- rozštěpení na dvě lehčí jádra

- **Štěpení atomových jader**

V odstavci o struktuře atomového jádra jsme se zmínili o silných jaderných interakcích držících jádro pohromadě proti odpudivým elektrickým silám mezi protony. Důležitou vlastností těchto silných interakcí je jejich krátký dosah činící jen  $10^{-13}$ cm.

- Tato vlastnost způsobuje, že nelze "složit" stabilní jádro o libovolně velkém počtu nukleonů - u velkých jader již silná interakce "nedosáhne" dostatečně z nitra jádra k periferním částem. Všechna jádra těžší než vizmut jsou radioaktivní.....

**Neutronem vyvolané štěpení** – je-li absorbován v těžkém jádře, vytvoří se složené jádro, pro něž je *vazbová energie na nukleon* menší než pro původní jádro.

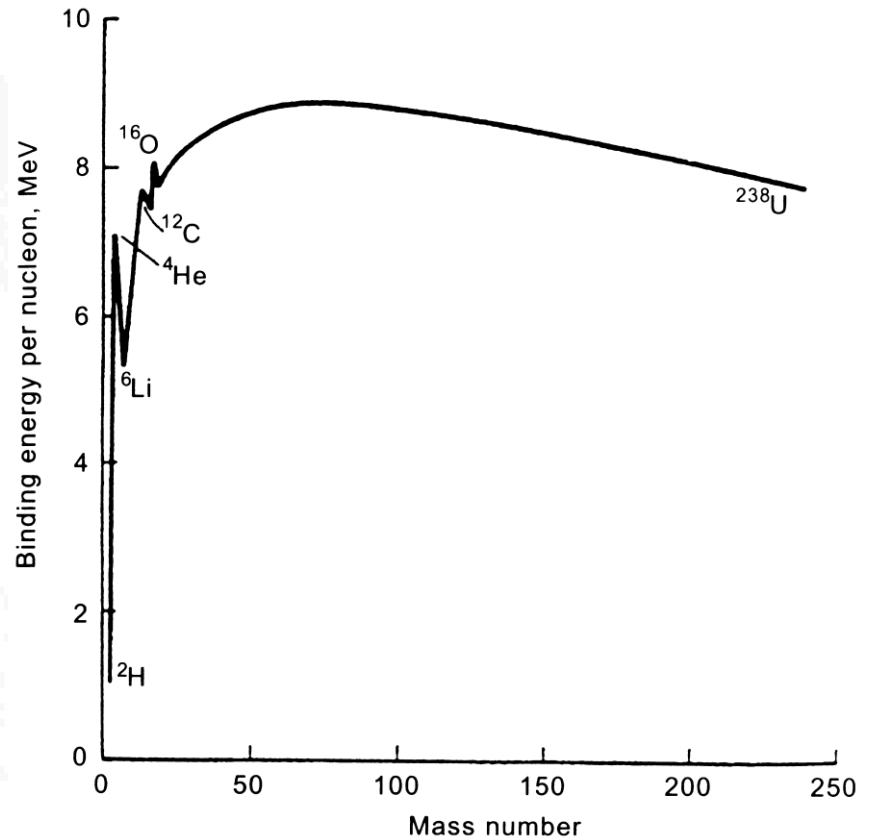
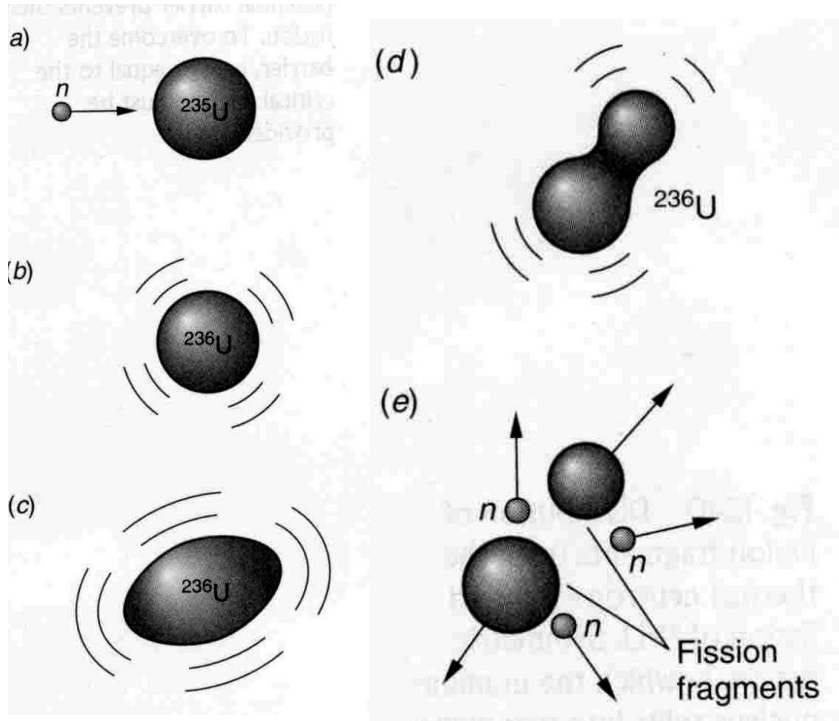
Pro některá jádra ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) je tato „redukce vazbové energie“ dostatečná k tomu, aby se složené jádro rozštěpilo, – štěpitelná (fissile) jádra

# Vazbová energie (binding energy)

- Pracujeme s vazbovou energií na jeden nukleon ( $B/A$ )

jakýkoli proces, při němž je vazbová energie na 1 nukleon na konci větší než na počátku vede ke konverzi hmoty na energii – fúze, štěpení

$$\Delta = Zm_p + (A - Z)m_n - m(A, Z)$$
$$B(A, Z) = \Delta c^2$$



# Neutron

- n je elektricky neutrální fermion, která podléhá silné, slabé a gravitační interakci, klidová hmotnost  $m_n = 1.67482 \times 10^{-27} \text{ kg} = 939.5656 \text{ MeV}$
- jako volná částice je neutron nestabilní -  $T_{1/2} = (986 \pm 10) \text{ s}$

Obvyklé rozdělení neutronů podle energie

Neutrony	Kinetická energie
Studené	$E_n < 0.025 \text{ eV}$
<b>Tepelné</b>	<b><math>0.025 \text{ eV} &lt; E_n &lt; 0.5 \text{ eV}</math></b>
Nadteplné	$0.5 \text{ eV} < E_n < 100 \text{ eV}$
Resonanční	$0.1 \text{ eV} < E_n < 1 \text{ keV}$
Střední	$100 \text{ keV} < E_n < 1 \text{ MeV}$
Rychlé	$1 \text{ MeV} < E_n < \mathbf{20 \text{ MeV}}$
Velmi rychlé	$20 \text{ MeV} < E_n$

Excitační fce JR ---

závislost účinného průřezu JR na energii nalétávající částice.

Excitační funkce je ovlivněna mechanismem jaderné reakce

(excitační funkce s prahem, s rezonančním a nerezonančním průběhem)

# Spektrum termálních neutronů

- Po dostatečně dlouhé době by spektrum mělo odpovídat Maxwellovskému spektru

$$n(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

- Pro nejpravděpodobnější rychlost získáme derivací

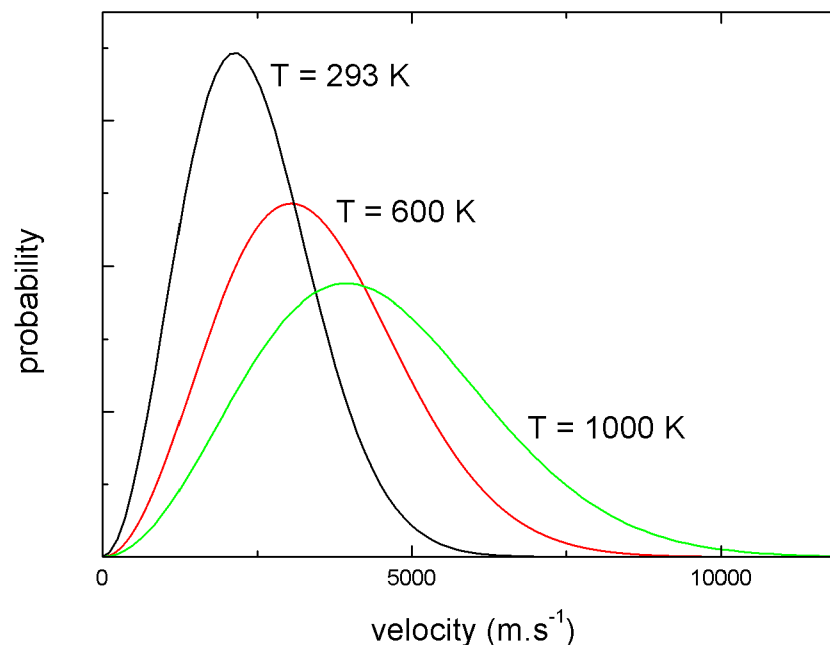
$$v_p = \left( \frac{2kT}{m} \right)^{1/2}$$

- Kinetická energie odpovídající této rychlosti je

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = kT$$

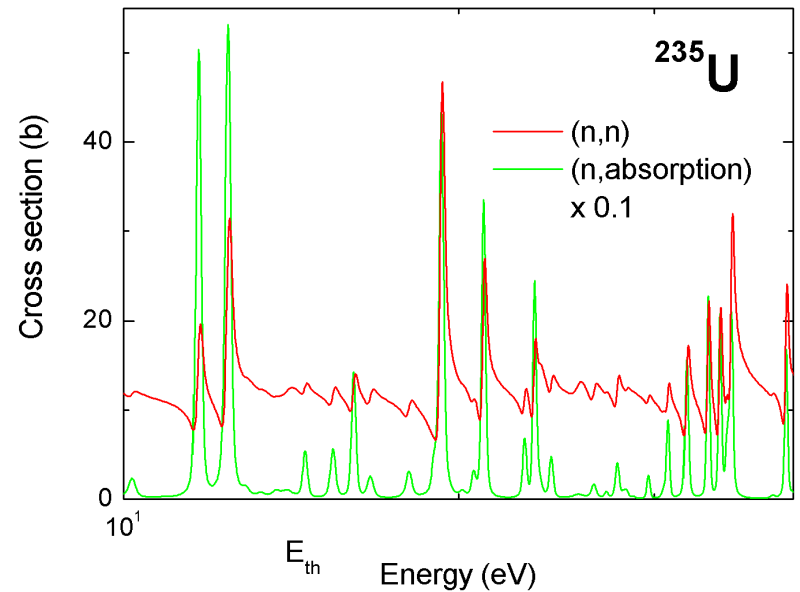
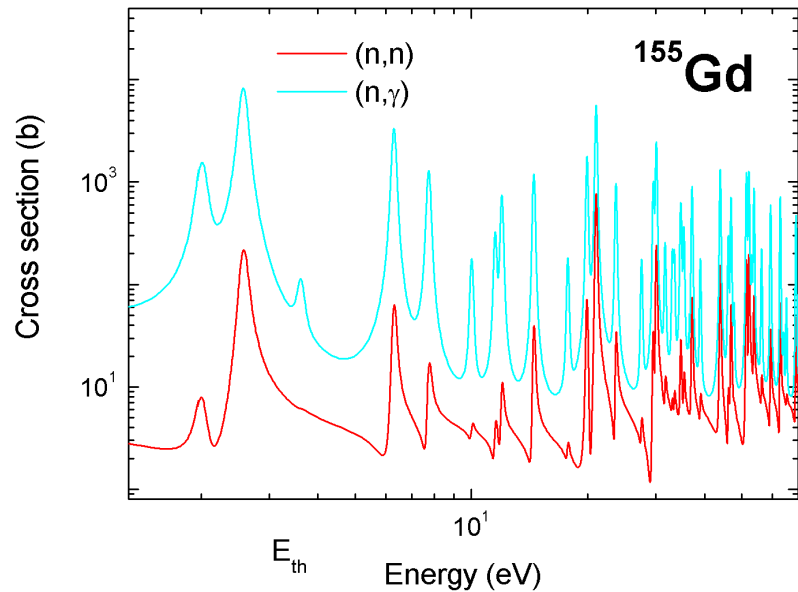
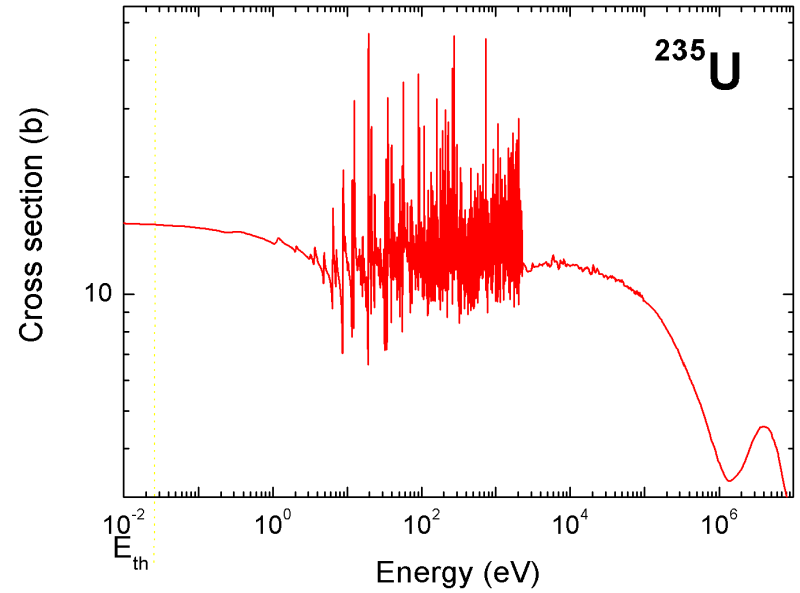
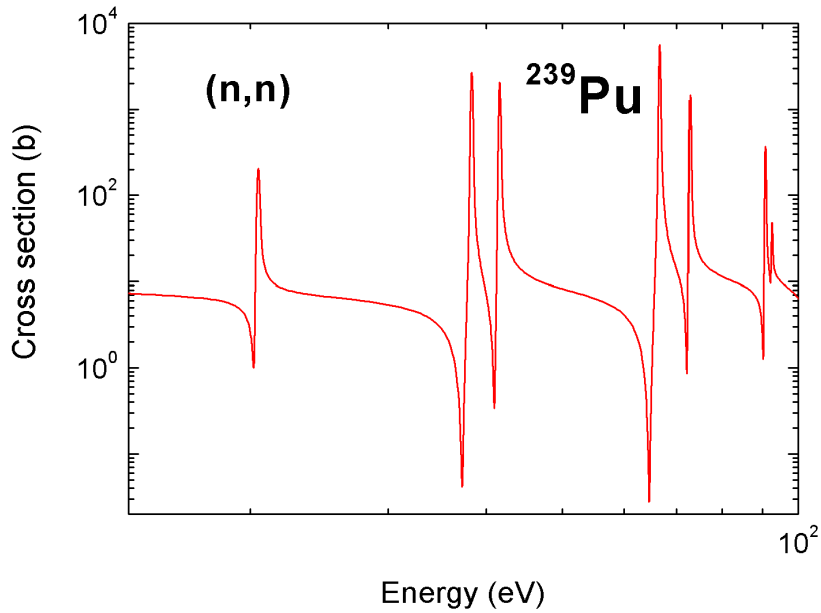
- Pro pokojovou teplotu je

$$v = 2200 \text{ m.s}^{-1}; E_k = 0.0253 \text{ eV}$$



Ve skutečnosti dochází v reaktoru k absorpci n s nízkými energiemi  
⇒ ztvrdnutí reaktorového spectra

# Elastický účinný průřez - příklady





# Štěpení

- reakce přes složené jádro
- je třeba překonat potenciálovou bariéru
- proces štěpení je energeticky výhodný již pro jádra s  $A > 80$ 
  - zisk energie při dělení je ale zpočátku velmi malý a výška potenciálové bariéry příliš velká, takže při excitaci jader spíše dojde k emisi nukleonu než k dělení jádra
  - teprve u nejtěžších jader je výška potenciálové bariéry přibližně rovna energii vazby jednoho nukleonu, takže štěpení jader se v některých případech stává převládajícím procesem
- z Weizsäckerovy formule se dá (porovnáním energie, která se při štěpení uvolní s Coulombickou energií) odhadnout, jaká jádra budou vůči štěpení nestabilní
  - dostaneme, že jádra se mohou samovolně štěpit asi při  $\frac{Z^2}{A} \gtrsim 50$

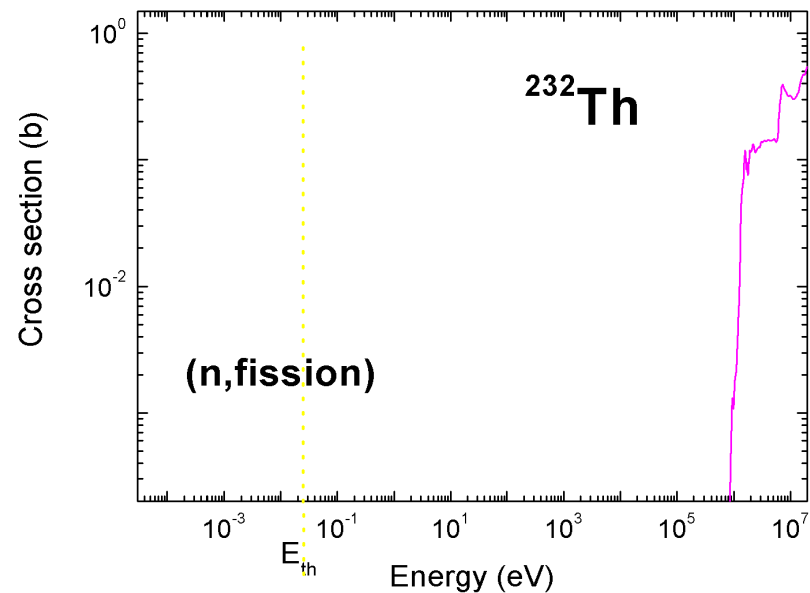
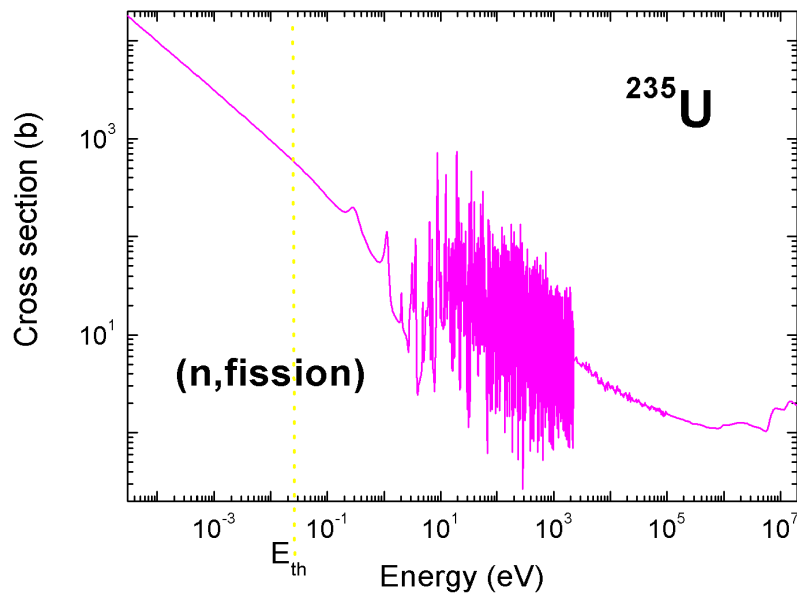
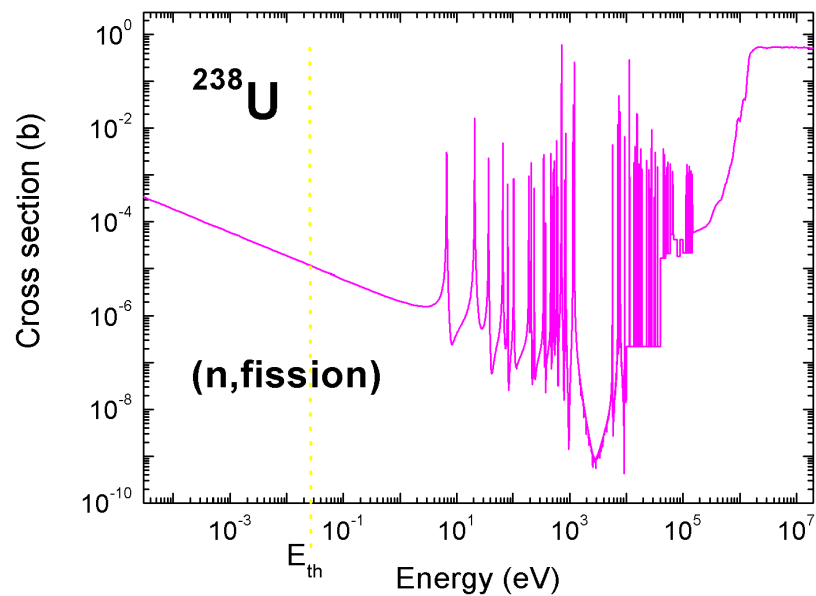
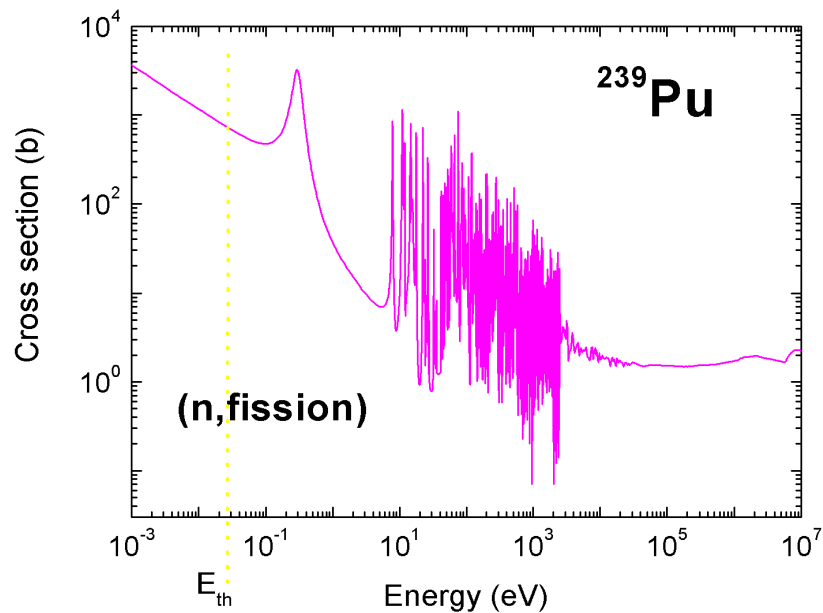
# Štěpení (II)

- představu o velikosti potenciálové bariéry dají experimentálně zjištěné energie štěpení  $\gamma$ -kvanty
- z tabulky vyplývá, že energie štěpení u nejtěžších jader je 5.5 - 6 MeV a málo závisí na druhu jádra
- relativně malé výšky potenciálových bariér umožňují i spontánní dělení
- bude-li excitační energie jádra vzniklého při záchytu n vyšší než prahová energie štěpení, může se jádro štěpit
- excitační energie jádra po záchytu n bude rovna součtu separační energie n a jeho kinetické energie
- obecně - lichá terčíková jádra (sudé produkty) jsou štěpitelná, sudá nikoli

nuklid	prahová energie (MeV)
$^{232}\text{Th}$	5.9
$^{233}\text{U}$	5.5
$^{235}\text{U}$	5.75
$^{238}\text{U}$	5.85
$^{239}\text{Pu}$	5.5

nuklid	separační energie (MeV)
$^{233}\text{Th}$	4.786
$^{234}\text{U}$	6.844
$^{236}\text{U}$	6.544
$^{239}\text{U}$	4.806
$^{240}\text{Pu}$	6.533
$^{241}\text{Pu}$	5.241

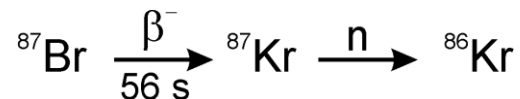
# Účinný průřez pro štěpení - příklady



# Štěpení (III) - produkty štěpení

- část uvolněné energie při štěpení přechází na energii excitace produktů dělení
- energie excitace každého produktu je významně vyšší než je vazbová energie neutronů v nich, takže při přechodu jader do základního stavu jsou zpočátku emitovány neutrony a posléze  $\gamma$ -kvanta
- n a  $\gamma$ -kvanta, emitované excitovanými produkty dělení, se nazývají **okamžité**
- stabilní těžká jádra mají přebytek neutronů ve srovnání se stabilními jádery středních hmotnostních čísel  $\Rightarrow$  produkty přesyceny n a jsou proto  $\beta^-$ -RA
  - energie  $\beta$ -částic a  $\gamma$ -kvant se mění na teplo, zatímco energie antineutrin uniká, protože antineutrino prakticky neinteraguje s látkou
- v řídkých případech produkty dělení při  $\beta^-$ -rozpadu emitují tzv. **zpožděné neutrony**

- příklad



- pro jaderný reaktor má význam pouze energie, která se mění v teplo

# Rozdělení energie uvolněné při štěpení

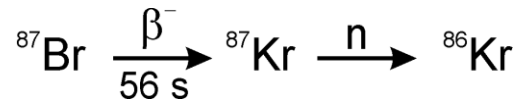
## Průměrná bilance energie při štěpení $^{235}\text{U}$

produkt	energie (MeV)	doběh
fragmenty štěpení	166.2 1.3	< mm
neutrony	4.8 0.1	10-100 cm
okamžité $\gamma$ -fotony	8.0 0.8	10-100 cm
$\beta$ -částice produktů štěpení	7.0 0.3	mm
$\gamma$ -záření produktů štěpení	7.2 1.1	10-100 cm
neutrina	9.6 0.5	nekonečno
celkem	202.8 0.4	

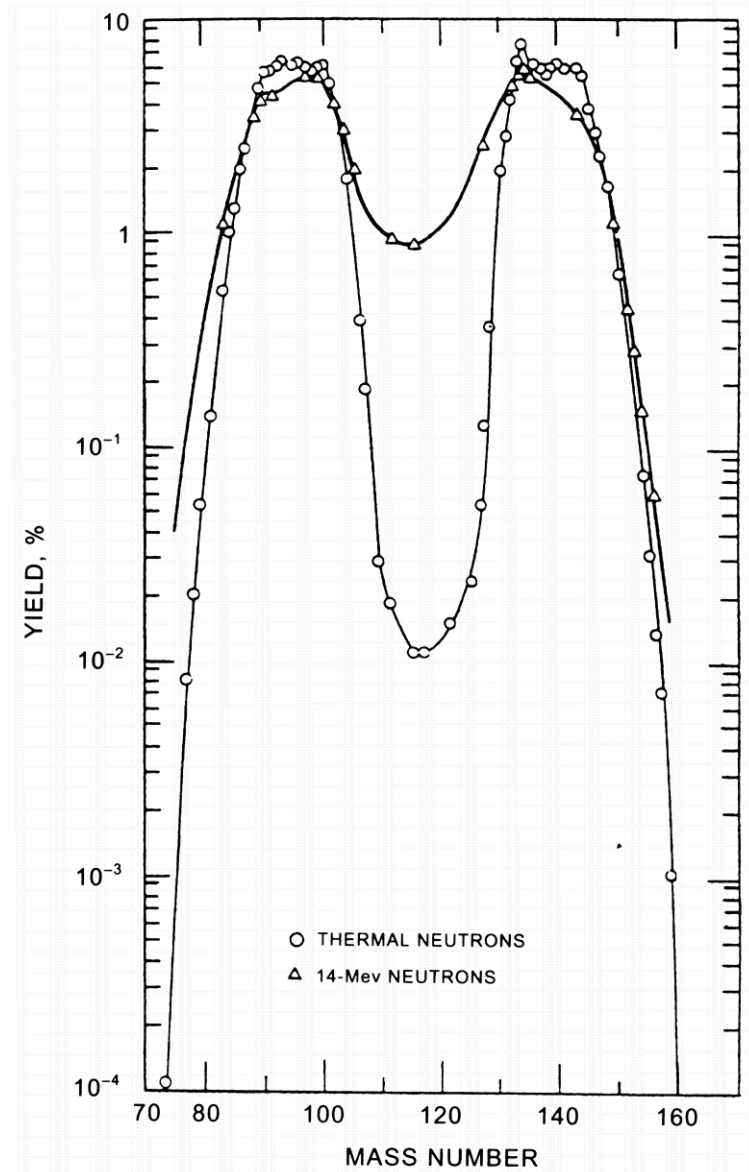
- Využitelná energie z jednoho štěpení se pohybuje okolo 200 MeV (v závislosti na nuklidu) - nedá se využít vlastně jen energie neutrin
- $1 \text{ W} = 3.1 \times 10^{10}$  rozštěpených jader/s
- (1 g štěpitelného materiálu obsahuje asi  $2.5 \times 10^{21}$  jader - 1g obsahuje asi MWd tepelné energie )

# Pravděpodobnost výskytu štěpných trosek

- několik desítek kanálů rozpadu - píky pro  $90 < A < 100$  a  $135 < A < 145$
- většina fragmentů jsou n bohaté (nestabilní) isotopy - dále se rozpadají  $\beta$ -rozpadem, případně emisí n (zpožděné neutrony)



- průměrně jsou při štěpení emitovány 2-3 n
  - přesné číslo záleží na mateřském jádře a energii nalétajícího n
  - střední počet n na 1 štěpení (tepelnými neutrony):
    - ${}^{235}\text{U}$  – 2.42
    - ${}^{239}\text{Pu}$  – 2.86



# Ustálené složení produktů

- složení produktů dělení se mění v důsledku  $\beta$ -rozpadu
- pokud však proces dělení pokračuje dostatečně dlouho, pak se u většiny radioaktivních produktů dosáhne rovnovážného stavu a jejich množství se nemění
- v rovnovážném stavu je
  - 25% produktů prvků ze skupiny vzácných zemin
  - 16% Kr+Xe
  - 15% Zr
  - 12% Mo
  - 6,5% Cs

# Jaderné reaktory

Proč jaderné reaktory? – v 1kg  $^{235}\text{U}$  500 000 krát více energie než v rozpadu 1kg  $^{238}\text{Pu}$

Je účelný pro projekty, kde jsou potřeba velké výkony zdrojů

Zdroj energie: štěpení

**Štěpná reakce** - štěpení jádra samovolné nebo po získání energie  
- obvykle se dodá energie záchytem neutronu  
- doprovázena vznikem neutronů s energiemi v oblasti jednotek MeV ( 2 - 3 neutrony na štěpení)  
(část hned – část zpožděná)

**Řetězová štěpná reakce:** Štěpení nuklidů  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  ... záchytem neutronu  
 $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U}^*$  : 85 % - štěpení  
15 % - emise fotonu

Štěpení - vznik **štěpných produktů**

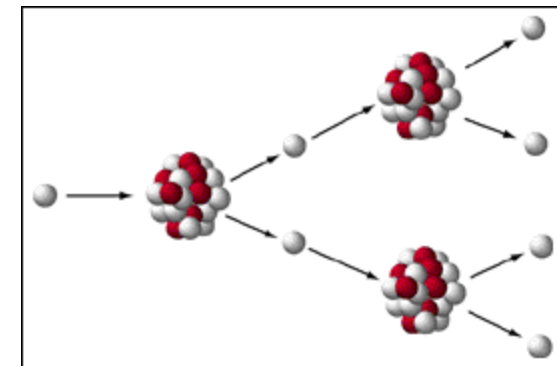
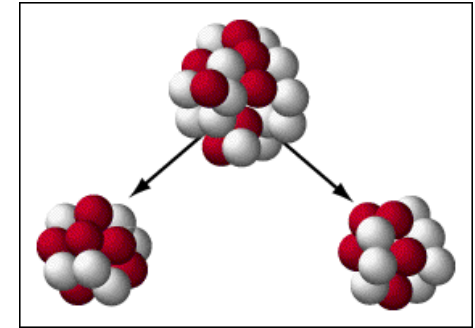
Záchyt  $\rightarrow$  emise fotonu  $\rightarrow$  rozpad beta vznik **transuranů**

**Multiplikační faktor k** - počet neutronů následující generace neutronů produkovaných na jeden neutron předchozí generace

$k < 1$  podkritický systém

$k = 1$  kritický systém

$k > 1$  nadkritický systém

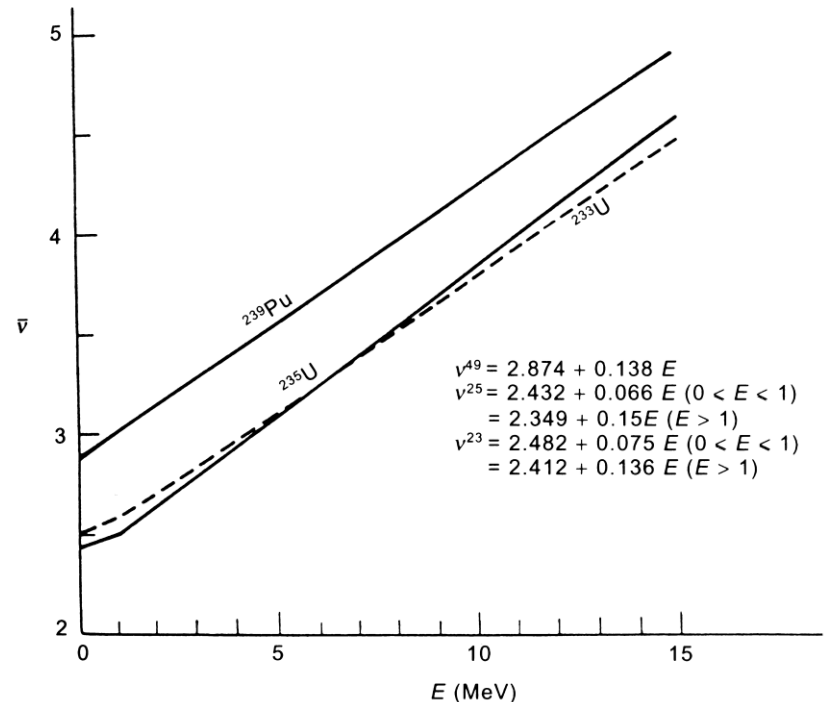


při štěpení se produkuje  
i několik neutronů



# Štěpná řetězová reakce

- štěpitelný nuklid + n  $\rightarrow$  2 štěpné trosky + n + energie
  - existuje asi 30 možných kanálů
  - štěpitelné nuklidy jsou pouze některé – užívá se U, Pu
  - vzniklé n mohou být použity pro následující stěpení výsledkem je řetězová reakce (pokud ji umíme řídit, může být využita)
- střední počet n na 1 štěpení (tepelnými neutrony):
  - $^{235}\text{U}$  – 2.42
  - $^{239}\text{Pu}$  – 2.86
  - je-li  $> 1$  pak přes ztráty n únikem a jinými reakcemi může běžet štěpná reakce





## Typy reaktorů:

### 1) Klasické na pomalé neutrony

Velmi vysoké hodnoty účinných průřezů záchyty neutronů pro malé energie neutronů ( $10^{-2}$  eV)  
Nutnost zpomalování neutronů - moderátor

**Palivo:** 1) přírodní uran - složen z  $^{238}\text{U}$  a jen 0.72 %  $^{235}\text{U}$   
2) obohacený uran - zvýšení obsahu  $^{235}\text{U}$  na 3-4% (klasické reaktory)

### 2) Rychlé (množivé) na rychlé neutrony

Nemoderované neutrony → nutnost vysokého obohacení uranu 20 - 50 %  $^{235}\text{U}$  (ekvivalentně  $^{239}\text{Pu}$ )

Vysoké obohacení → vysoká produkce tepla → nutnost výkonného chlazení → roztavený sodík, olovo (teplota 550°C)

Produkce  $^{239}\text{Pu}$ :  $^{238}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{239}\text{U}(\beta^-) + \gamma \rightarrow ^{239}\text{Ne}(\beta^-) \rightarrow ^{239}\text{Pu}$

Z  $^{239}\text{Pu}$  více neutronů (3 na jedno štěpení) → produkce více plutonia než se spotřebuje (plodivá zóna)

Je kompaktnější, produkuje více energie – dlouhodobá zkušenost s reaktory na ponorkách

Např: ruské ponorky třídy Alfa – kompaktní (4,5 m x 7,5 m)  
rychlý reaktor chlazený kapalnou směsí olova a bismutu,  
výkon 175 MW



Ruská ponorka třídy Akula Typhoon  
vodou chlazený reaktor

Mimo zemi zdroje



# Historie využití



**USA:** Malý reaktor SNAP-10A → zdroj energie - družice  
SNAPSHOT (1965) - výkon

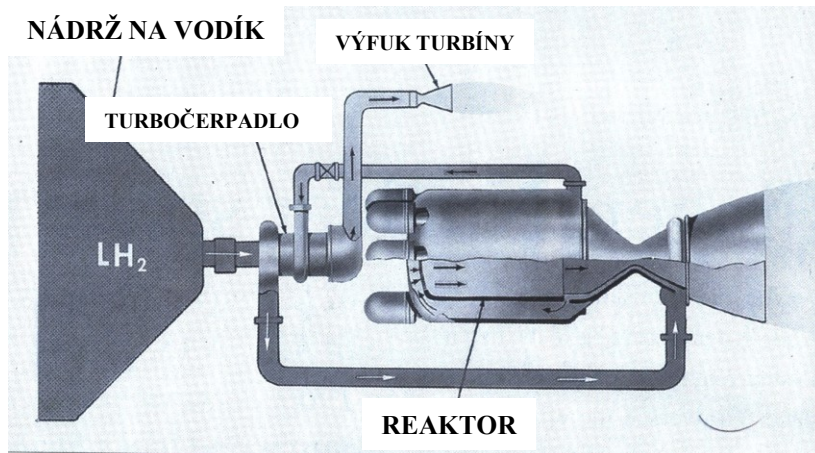
**Projekt NERVA:** raketový motor na bázi jaderného reaktoru  
plánován jako třetí stupně raket

Reaktor ohřívá vodík → pohon expandující horký plyn

Řada velmi úspěšných testů

H. Finger vedoucí projektu

Nedokončen – zastaveno – hlavně  
z finančních důvodů – chyběla mise,  
která by se bez něj neobešla



Princip motoru NERVA



Studené zkoušky motoru NERVA

## SSSR - Rusko

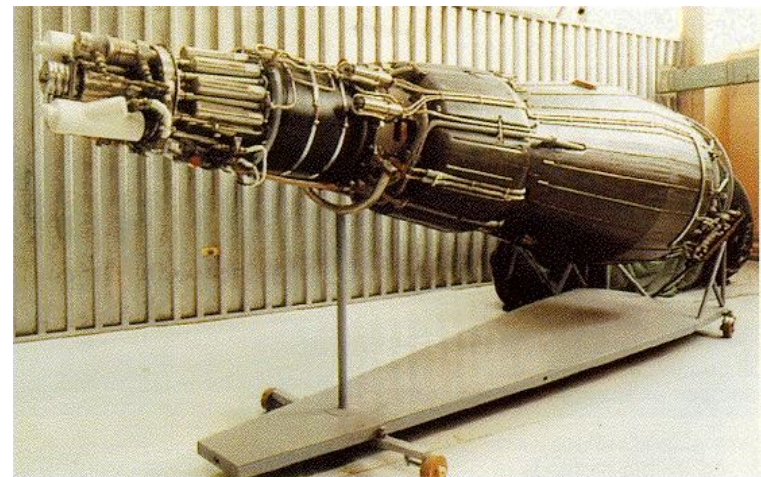
Jaderný reaktor na ruských vojenských družicích – **program RORSAT** (napájel radar), léta 1967-1988 - 35 družic v sérii Kozmos (první Kozmos 198) vysoce obohacen  $^{235}\text{U}$  (31,1 kg) , účinnost 2-4%, **elektrický výkon 3-5 kW** aktivní činnost do 134 dní – po jejím ukončení vyneseny na vysokou orbitu 900 -1000 km

**Tři havárie** – 1) zničení jedné z družic krátce po startu  
2) zbytky Kozmosu 954 spadly na západní Kanadu  
3) Kozmos 1402 shořel v atmosféře

**Reaktor TOPAZ I** (rok 1987) elektrický výkon 5 - 6 kW, hmotnost okolo 1000 kg, účinnost 5 – 10 % nejméně po 180 dnů (Kozmos 1818 a 1867) a může pracovat rok chlazení tekutým kovem (slitina sodíku a draslíku) (pracovní teplota 610°C)

Vylepšená varianta **TOPAZ II** – do vesmíru se už nedostal, testován i NASA

Základ společné spolupráce USA a Ruska  
Využití ruských zkušeností



Malý ruský kosmický reaktor TOPAZ



## Zatím nenaplněné sny - projekt Orion

Snaha o vybudování pohonu na základě výbuchů „malých jaderných bomb“ blízko lodi. Ty „postrkovaly“ loď díky odrazné desce.

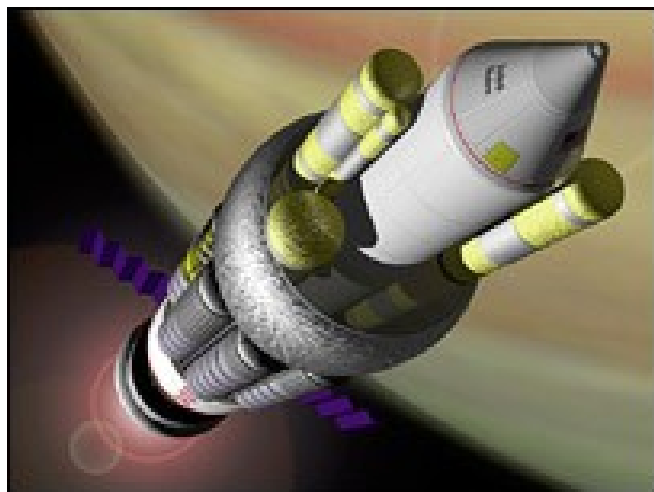
Velmi krátké působení velmi velké síly ↔ velké přetížení ↔ nutnost rozložení zrychlování

Studie probíhala v letech 1958 – 1965 ↔ vedoucí T. Taylor

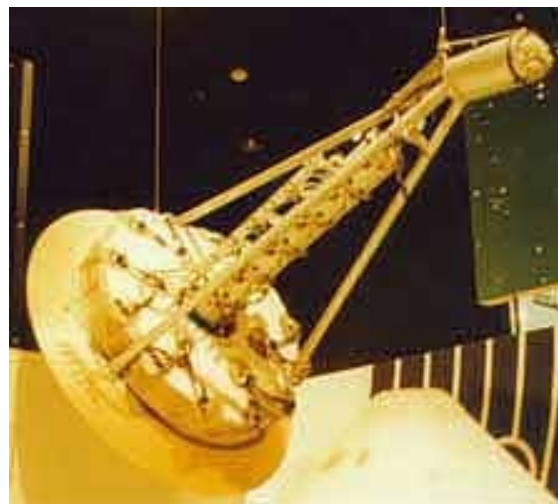
Řada studií i praktických testů (např. odolnosti odrazné desky)

Velmi krátký průběh exploze → poměrně malé poškození desky

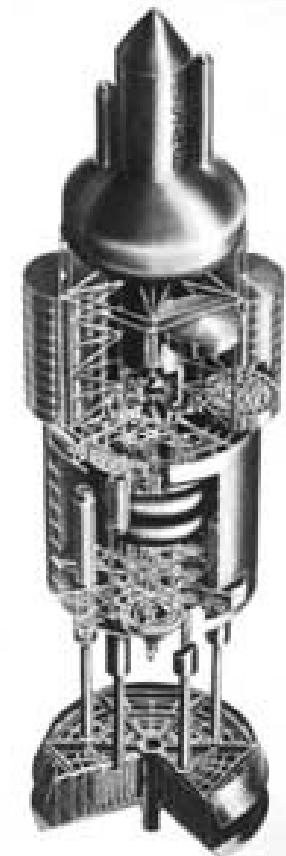
Testy pomocí chemických explozí – let sto metrů (šest nábojů)  
(září 1959) – prokázala **stabilita pulzního pohonu**



Kosmická loď Orion v blízkosti Jupitera



Model pro testování odrazné desky



Náčrt lodi Orion

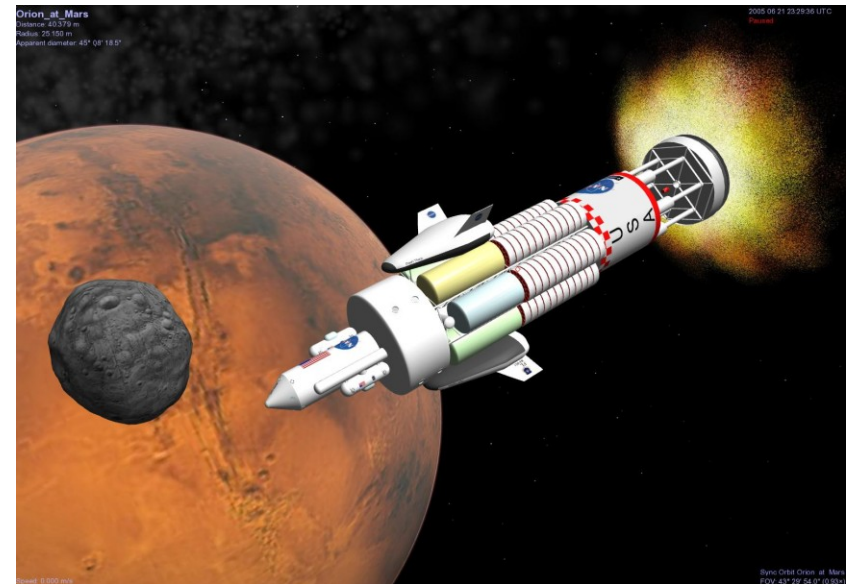
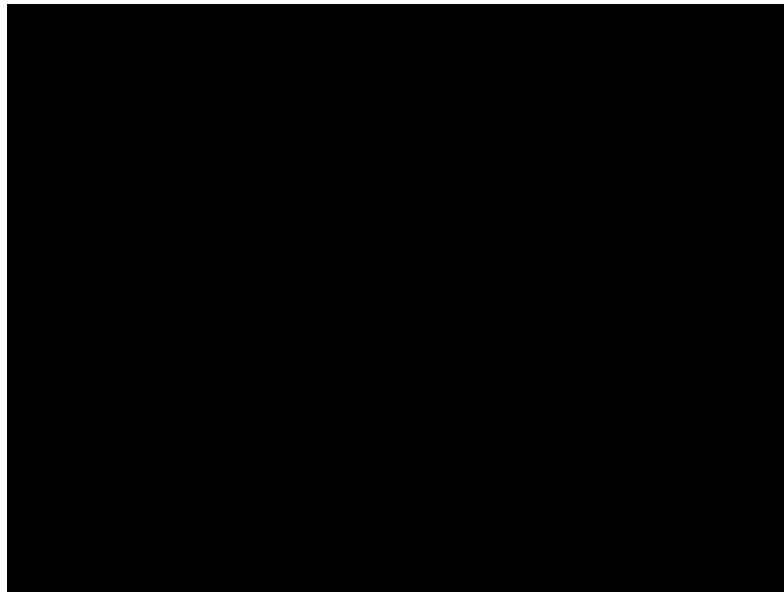
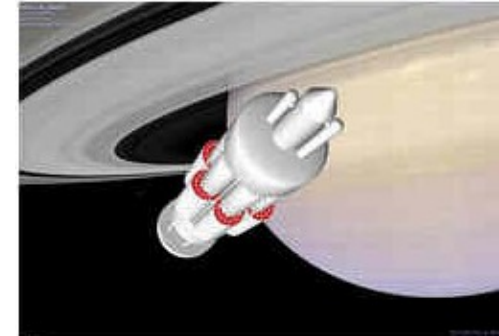


Uvažovala se řada typů pro cestu na Mars i dále, včetně mezihvězdných  
vždy jako lodě s lidskou posádkou

Zpočátku plány i pro použití v atmosféře, později pouze ve vesmíru  
Radiační riziko, možnost ohrožení životního prostředí

Uvažovalo se použití i vodíkových bomb – projekt Daedalos

V současnosti opětné oživení zájmu i o tuto koncepci



animaci spust'te kliknutím na ni



## Projekt Prometheus – nové jaderné reaktory

Návrat na Měsíc a cesta na Mars, komplexní sondy do vzdálených částí sluneční soustavy → potřeba jaderných zdrojů energie a pohonu

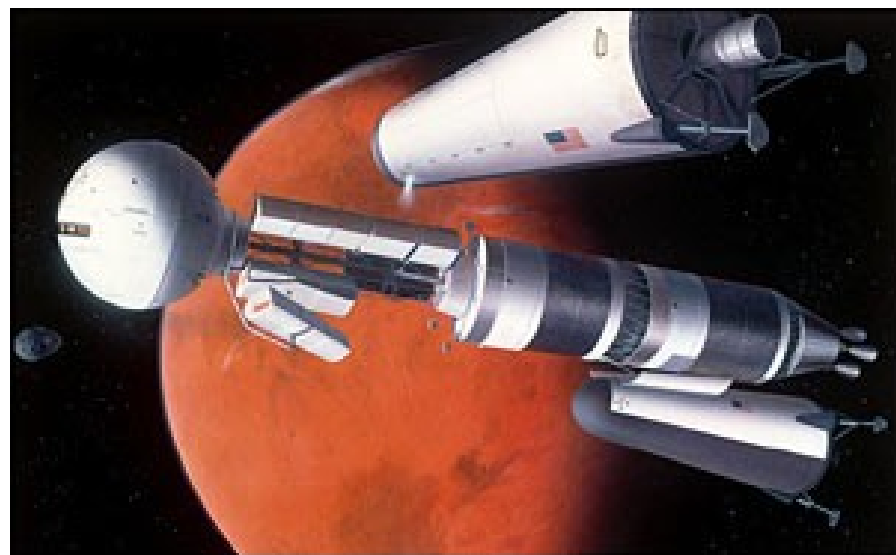
Start programu v roce 2003

Spolupráce NASA s DOE (Úřad pro energetiku USA)  
maximální využití zkušeností předchozích projektů  
spolupráce s Ruskem (reaktor TOPAZ)

Vývoj nových radioizotopových zdrojů a hlavně reaktorů  
pro pohonné jednotky i pro dodávku energie a tepla



Pohonná jednotka blízko Země



Let lidí na Mars by mohly jaderné zdroje velmi ulehčit



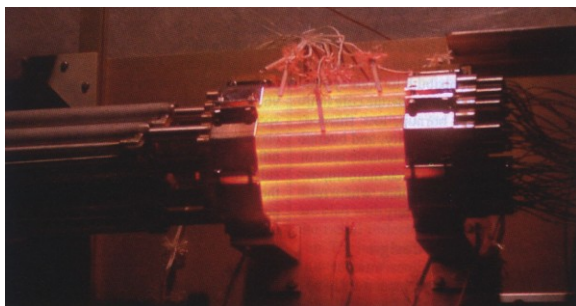
Projekt sondy obíhající kolem Jupitera a přesunující se od jednoho měsíce k druhému





## SAVE 400 - reaktor - zdroj elektrické energie pro iontový motor i přístroje sondy

Dlouhodobě pracující motor s malým zrychlením → cesty ke vnějším planetám



Tepelný test reaktoru SAVE 30

Spolupráce NASA a Los Alamos

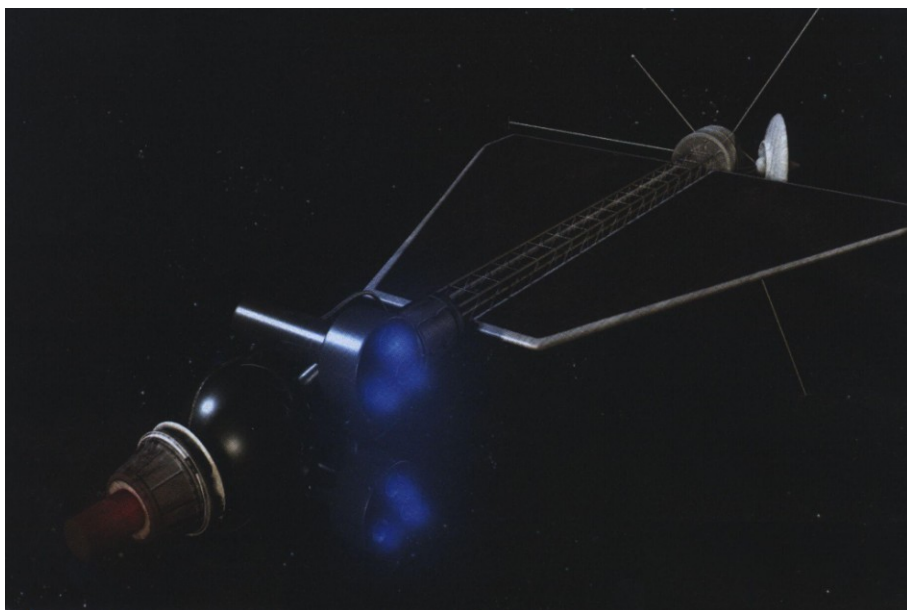
**Výkon:** 400 kW tepelný, 100 kW elektrický

**Palivo:** vysoce obohacený uran (97%  $^{235}\text{U}$ )

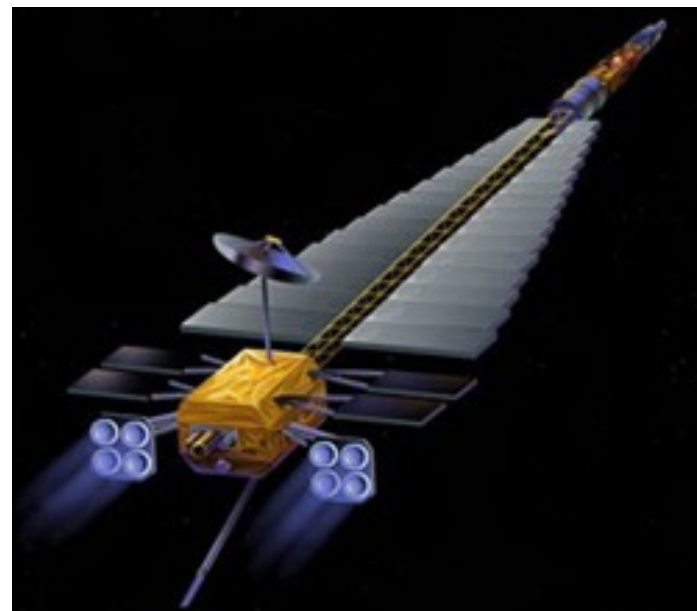
**Typ :** rychlý reaktor

**Chlazení:** plyn (He+Xe)  $T \sim 1000^\circ\text{C}$

**Hmotnost:** 512 kg (100 kg  $^{235}\text{U}$ )



Koncept sondy s jaderným iontovým motorem pro průzkum vnějších částí Sluneční soustavy (NASA)



Sonda pro průzkum ledových měsíců Jupitera



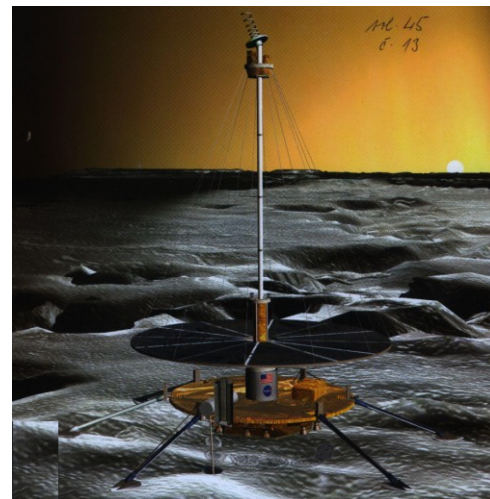
## Jaderné reaktor pro vozítka a přistávací moduly

**HOMER-15** - malý reaktor, vysoce obohacený uran (72 kg)

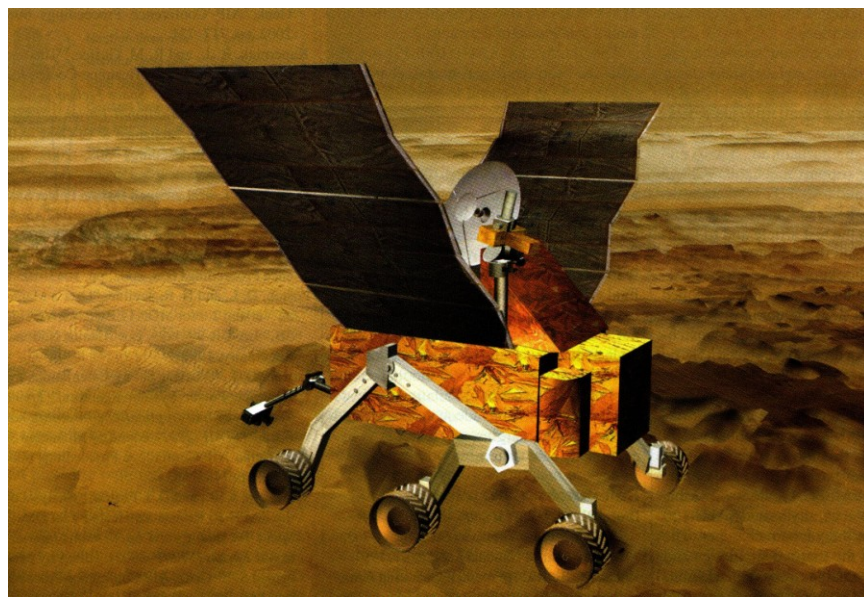
**Výkon:** 15 kW tepelných a 3kW elektrické

Soužil by pro menší stanice, přistávací pouzdra, vozítka a sondy

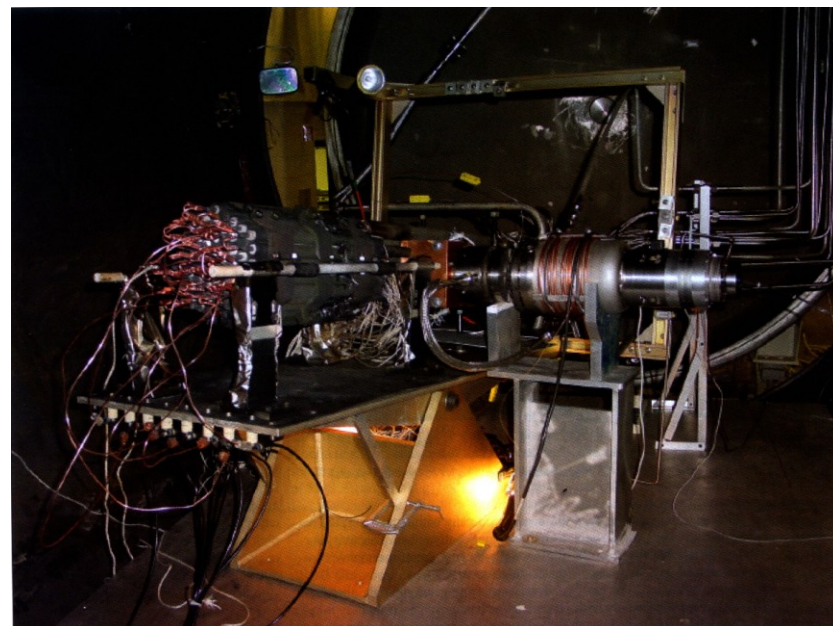
V některých variantách by mohl být nahrazován radioizotopovým zdrojem



Přistávací modul na Marsu



Marsovské vozítko



Test reaktoru HOMER 15

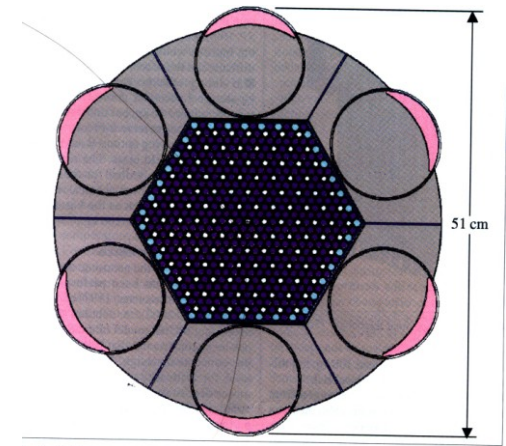


## Hlavní cíl - bezpečnost a efektivita

**Vysoká bezpečnost - podkritický při všech haváriích**

**SAFE 400 – rotující kontrolní tyče z berylia na jedné straně (odráží neutrony) a absorpční vrstvy na druhé, pokud nerotují, reaktor je podkritický → není štěpná reakce**

**Hlavní důraz na ekologickou bezpečnost za všech okolností – nutnost přesvědčit o ní veřejnost**



Schematický náčrtek reaktoru SAFE 400

**Na oběžnou dráhu se dostává před zahájením činnosti – vysoce radioaktivní jsou produkty štěpení a transurany, uran není tak nebezpečný**

**Při každé havárii zůstává uran kompaktně v celku a v obalu – co nejodolnější obal schopný efektivně odolávat teple a destruktivním silám**

**Malá radiační zátěž i během provozu → možnost práce na oběžné dráze okolo Země**

**Hledání co nejefektivnější konverze tepelné energie na elektrickou a pohybovou.**



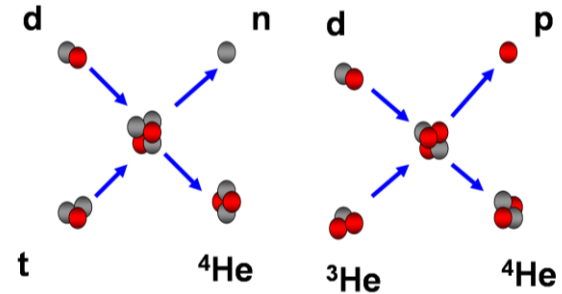
## Termojaderné zdroje energie

Slučování lehkých prvků: d, t,  $^3\text{He}$

Uvolnění velkého množství energie v podobě kinetické energie produktů nebo gama záření

Jaderné reakce za vysokých teplot ( $10^7 - 10^9 \text{ K}$ )  $\leftrightarrow$   
 $\leftrightarrow$  termojaderné reakce

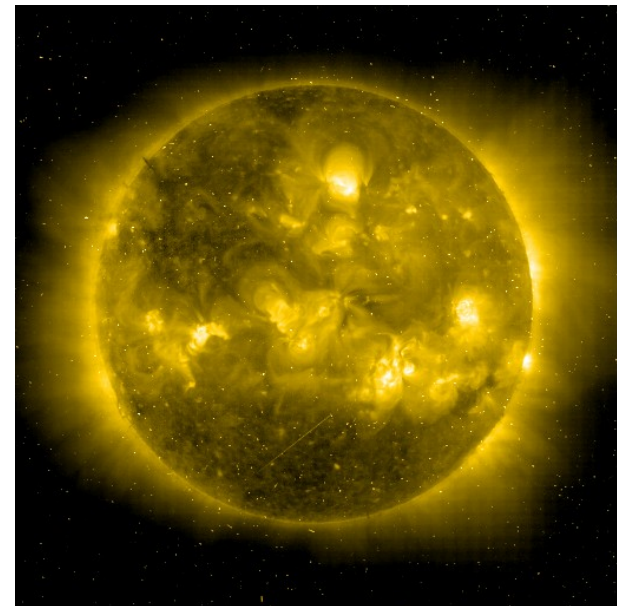
Výhoda oproti štěpení je poměrně malá produkce radioaktivních elementů (pouze reakcemi neutronů s materiálem komory)



Vhodné reakce jsou  $d + t$  a  $d + ^3\text{He}$



Teodor Rotrekl: „Záhady pro zítřek“



V přírodě probíhá jaderná fúze na Slunci



## Fyzikální principy a technické problémy

Zdroj pohonu (např. termojaderné mikrovýbuchy → horké plazma tryská s vysokou rychlostí) i energie (termojaderné elektrárny)

Problém umělé fúze – zajištění produkce a udržení dostatečně horkého a hustého plazmatu zatím nezvládnuto ani na Zemi

Experimentální "**termojaderné reaktory**" typu Tokamak: Prstencová komora - prstencové magnetické pole (výška komory 2 - 4 m,  $B = 2 - 5$  T, proudy  $2 \cdot 10^6$  A):

**Lawsonovo kritérium** - podmínka pro to, aby termojaderná reakce produkovala více energie než se spotřebuje na ohřev paliva:

Pro DT reakci:  $\tau\rho \geq 3 \cdot 10^{20} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$

$\tau$  - doba udržení horké plazmy,

$\rho$  - hustota jader v plazmatu

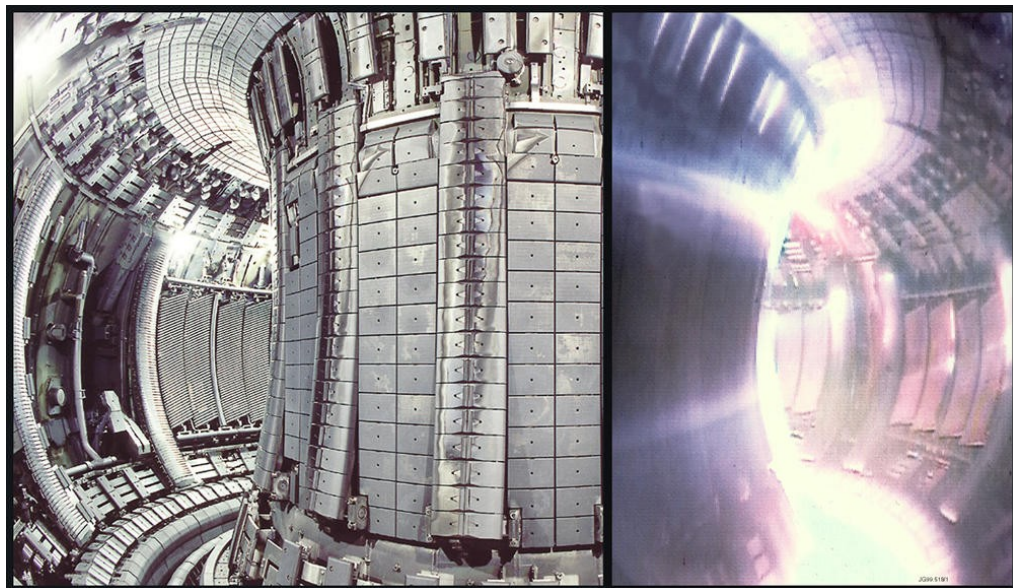
Teplota  $10^8 - 10^9$  K

**ITER** - mezinárodní termojaderný experimentální reaktor:

Prstenec: poloměr 8 m, výška 9 m

Výkon  $> 500$  MW, vyprodukuje

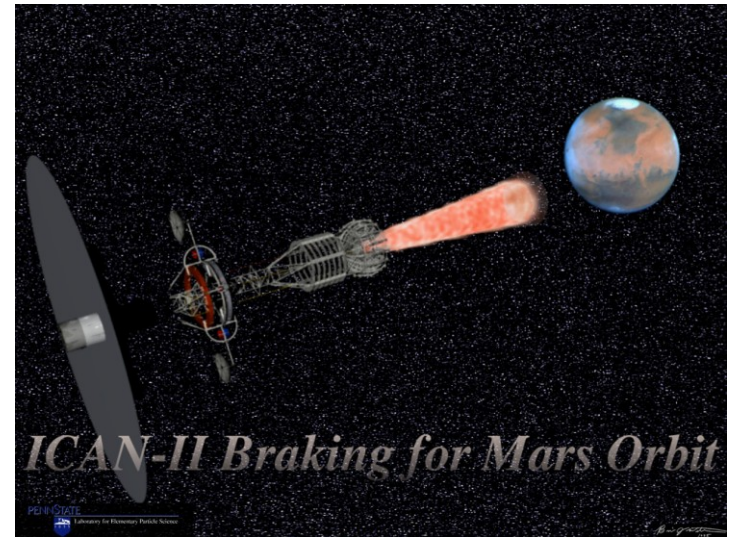
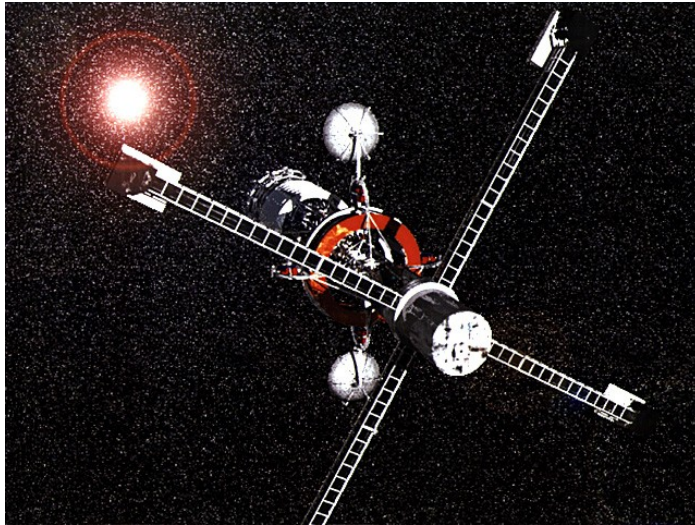
5 krát více energie než spotřebuje



Experimentálního zařízení JET v Culhamu (výška 12 m, průměr 15 m)



## Projekty - zatím jen na papíře



Mikrofúze inicializovaná lasery, antihmotou

Nejpropracovanější projekt Pensylvánské university  
– **ICAN-II**

Projekt fúzně poháněné sondy využívající pro inicializaci antiprotony skladované v magnetickém prstenci.

využívaly by se reakce deuteria a tritia katalizované nebo inicializované antiprotony





## Pohon založený na antihilaci

Setkání hmoty a antihmoty – **anihilace** → přeměna hmoty na fotony a mezony → mezony se rozpadají v konečném důsledku na fotony → uvolnění energie:  $E = mc^2$   
přeměna klidové hmotnosti (energie) na energii kinetickou → nejkompaktnější zdroj energie

**Ekvivalent pohonu raketoplánu – ~ 100 mg antihmoty**

**Problém:** Nemáme zdroje antihmoty → musíme ji vyrobit – potřebujeme mnoho energie

Nutná energie větší než klidová energie (hmotnost) páru částice a antičástice ( $E = mc^2$ )

**Urychlovače jako zdroje energie pro produkci antičástic**

Účinnost výroby antiprotonů (nyní) –  $10^5$  protonů ( $E_p = 120$  GeV) na jeden antiproton →  $1,2 \cdot 10^{16}$  eV/antiproton →  $1,16 \cdot 10^{21}$  J/g . **Efektivita  $10^{-8}$ .**

v současnosti se produkuje okolo 10 ng antiprotonů za rok





Současné metody umožňují – zlepšení o 3-4 řády

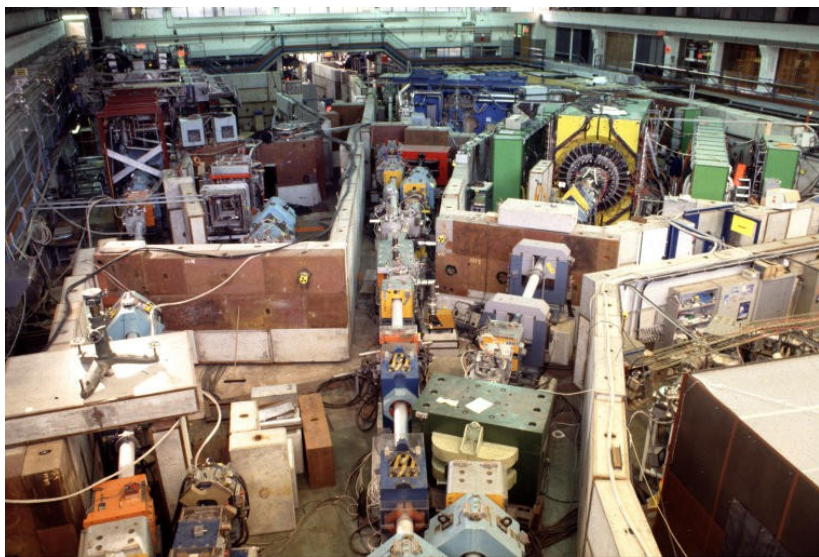
Skladování – magnetická a elektrická pole

Současná produkce stačí jen na kombinovaný pohon

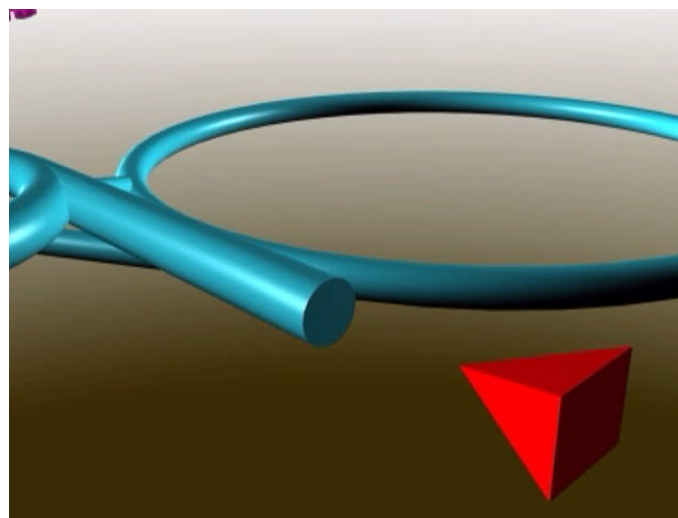
během letu je možno antihmotu uchovávat  
v magnetické prstenci (AIMstar potřebuje 28,5  $\mu\text{g}$ )

Dnes jsme schopni udržet antiprotony v magnetické  
pasti i stovky dní

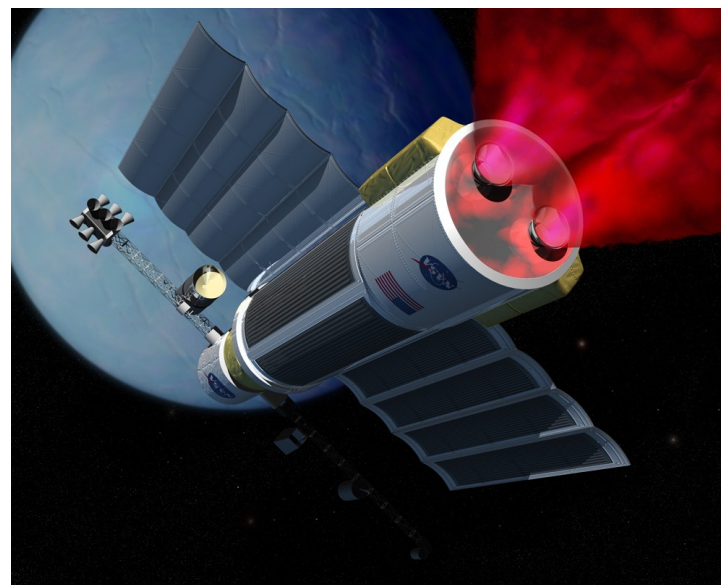
Velké zkušenosti s produkcí pomalých antiprotonů v  
CERNu



Část zařízení LEAR pro produkci pomalých  
antiprotonů (protonový urychlovač v CERNu)



Produkce antiprotonu – animaci spustit  
kliknutím na ni



Mezihvězdná loď AIMstar (studie  
provedená na Pensylvánské universitě)



# Závěr

- 1) **K intenzivnější činnosti člověka v blízkém i vzdálenějším vesmírném okolí jsou nutné velmi výkonné zdroje energie – zajištění přepravy, tepla a elektrické energie**
- 2) **Těmito zdroji musí být s největší pravděpodobností zdroje jaderné**
- 3) **Jsou tyto možnosti: Radioizotopové, štěpení, jaderná fúze a využití antihmoty**
- 4) **Zatím se využívají radioizotopové zdroje (menší výkony) a štěpné reaktory (větší výkony) Od roku 2003 nová etapa zájmů o tyto zdroje. Nutná „politická zakázka“ – mise, která by takové zdroje požadovala.**
- 5) **Takovou misí by mohla být**
  - A) **trvalá měsíční základna**
  - B) **cesta lidí na Mars**
  - C) **komplexní sonda do vnějších částí Sluneční soustavy**
- 6) **Využití předchozích zkušeností z vesmíru i ze Země**
- 7) **Pro intenzivní osvojení meziplanetárního prostoru a mezihvězdné lety – nutnost osvojení jaderné fúze či využití antihmoty**
- 8) **Technicky jsou problémy řešitelné, jde o to, zda se lidstvo pro toto dobrodružství rozhodne**

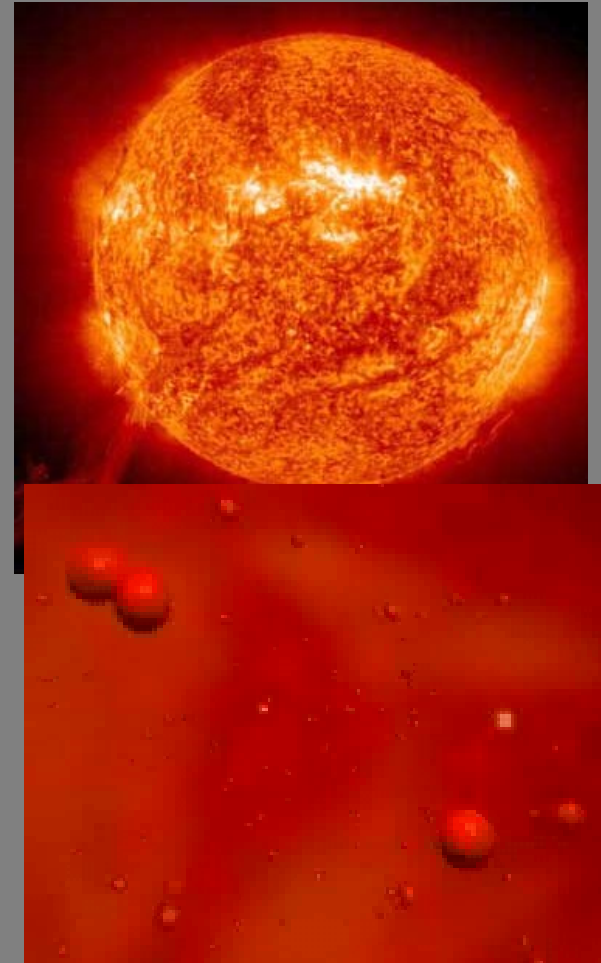


## Jaderná syntéza a jaderné štěpení

### Jaderná syntéza

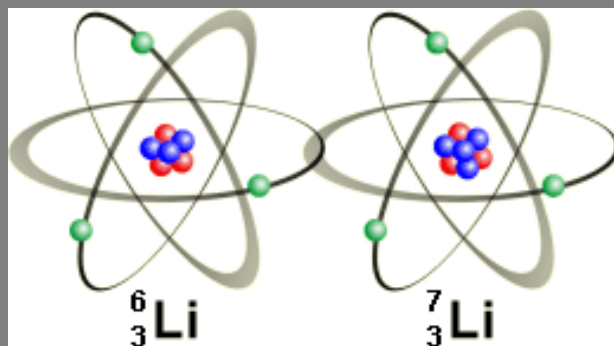
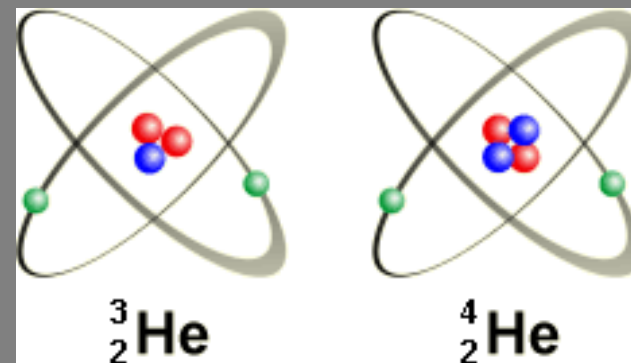
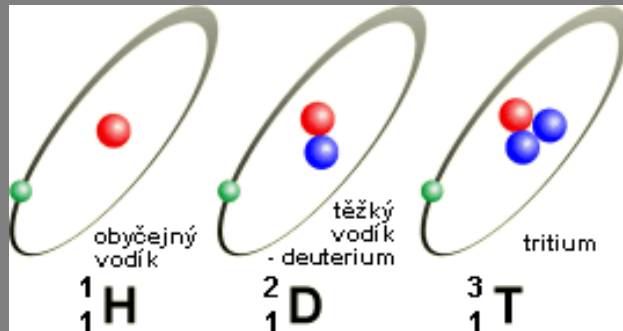
je děj, při němž sloučením dvou lehkých jader vznikne jádro těžší a uvolní se energie.

Jaderná syntéza probíhá ve hvězdách za vysokých teplot –  $10^6\text{K}$ .  
Jde o termonukleární reakce.



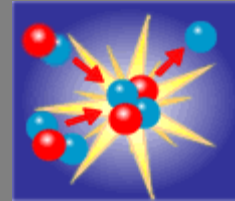
Př. Slunce – vodík se skládá v helium – každou sekundu se přemění 504 miliony tun vodíku v 500 milionů tun helia a 4 miliony tun se vyzáří ve formě energie.

# Nejdůležitější izotopy jaderné syntézy.



# Proces termonukleární fúze

Nejprve do prstence umístíme několik gramů paliva (D+T).  
Toto palivo následně zahřejeme na teplotu kolem 100 miliónů °C.



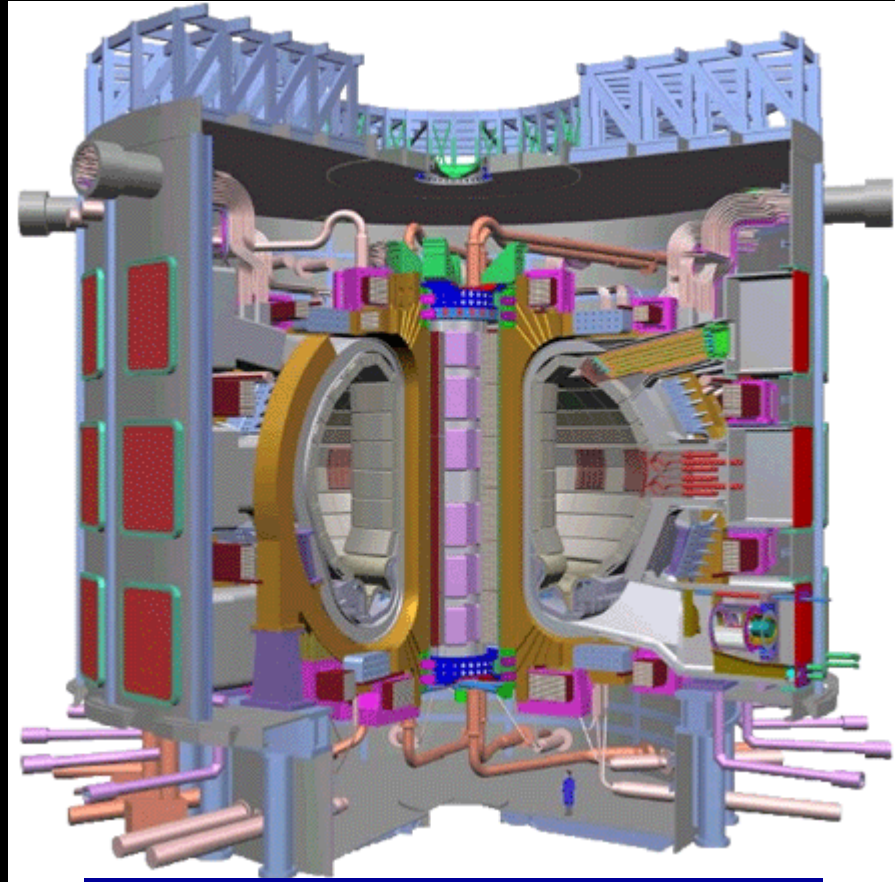
Hlavní část energie vzniklé touto reakcí je odnášena přebytečnými neutrony, které nejsou zachycovány magnetickou pastí.

Vysokoenergetické neutrony jsou zachycovány až obálkou reaktoru, která je tvořena vodou chlazenými štíty s velkým obsahe berylia.

Jako součást obálky reaktoru by bylo možné použít také lithium . Lithium se totiž pod dopadem neutronů mění na tritium a díky tomu by bylo možné přímo získat tu část paliva, která se v přírodě volně téměř nevyskytuje.

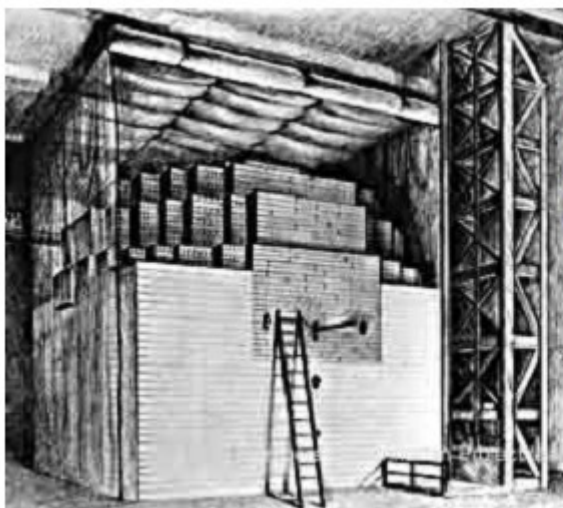
# ITER - TOKAMAK nové generace

Výkon > 500 MW, vyprodukuje 5 x více energie než spotřebuje



Jaký je časový plán ITERu?





regulace výkonu: reaktor se udržuje podkritický na okamžitých neutronech, potřebný příspěvek dodávají zpožděné neutrony z neutronového rozpadu fragmentů.

THE

END

# Podmínky udržení štěpné reakce

- na 1 štěpení připadají 2-3 uvolněné neutrony
- pro udržení štěpné reakce je nutné, aby v průměru alespoň jeden neutron přežil a vyvolal novou štěpnou reakci
- soupeřící procesy ke štěpení:
  - radiační záchyt v palivu
  - záchyt neutronů v neštěpitelném materiálu
  - únik neutronu
- Účinný průřez pro štěpení závisí na energii přibližně jako  $1/v$
- Definuje se několik koeficientů:
- podíl záchytového a celkového  $\sigma$ 
$$\frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_\gamma} = \frac{1}{1 + \sigma_\gamma/\sigma_f} = \frac{1}{1 + \alpha}$$
  - pro důležité štěpitelné nuklidy se tento faktor zmenšuje s rostoucí energií
  - obvykle se ale používá jiné veličiny



# Další koeficienty – neutronová výtěžnost

- neutronová výtěžnost  $f$ 
  - pravděpodobnost, že  $n$  bude absorbován ve štěpitelném nuklidu místo, aby byl absorbován v neštěpitelném, či by unikl ze systému

$$\frac{\text{absorb fissile}}{\text{absorb fissile} + \text{absorb nonfissile} + \text{leak}} = \frac{\text{absorb fissile}}{\text{absorb total}} \frac{1}{1 + \text{leak}/\text{absorb total}} \equiv f P_{NL}$$

- $f$  je frakce absorbovaných  $n$  absorbovaných ve štěpitelných nuklidech

$$f = \frac{N_{\text{fis}} \sigma_a^{\text{fis}}}{N_{\text{fis}} \sigma_a^{\text{fis}} + N_{\text{other}} \sigma_a^{\text{other}}}$$

- $P_{NL}$  je pravděpodobnost, že neutron neutře ze systému
  - $N$  je počet „terčkových“ jader
- účinný průřez pro absorpci  $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma$  je mnohem větší pro tepelné neutrony než pro rychlé ve štěpitelných nuklidech, a porovnatelný v neštěpitelných  $\Rightarrow$  výtěžnost silně závisí na energii a je významně větší pro tepelné neutrony

# Další koeficienty

- součin  $\eta f$  je počet neutronů produkovaných, v průměru, ze štěpení štěpitelných nuklidů na každý neutron absorbovaný v systému
- existují i n produkované v interakcích (zvláště rychlých n) v neštěpitelných nuklidech paliva
- definuje se „faktor rychlého štěpení“  $\varepsilon$

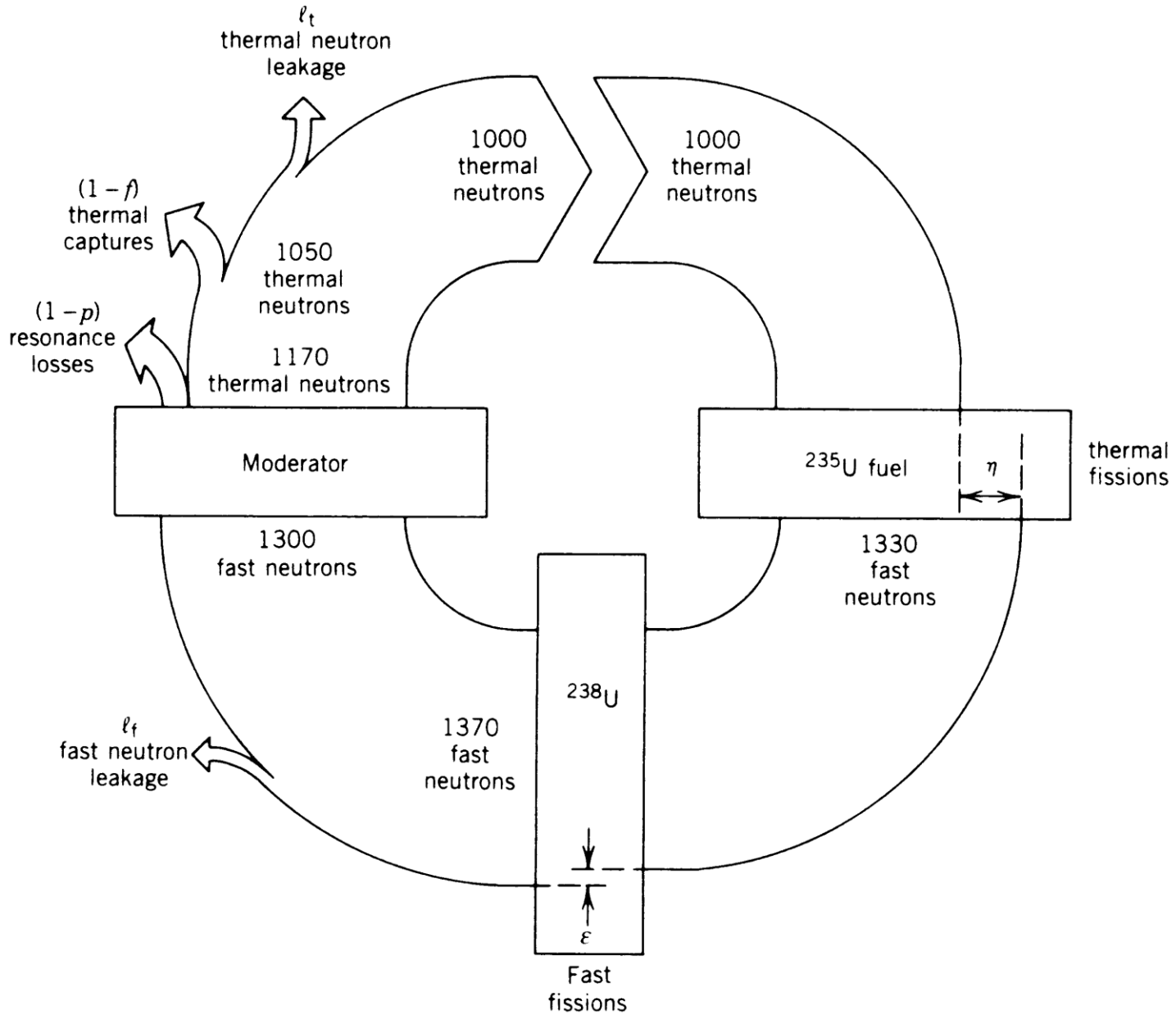
$$\varepsilon \equiv \frac{\text{total fission neutron production rate}}{\text{fission neutron production rate in fissile nuclides}}$$

- $\eta f \varepsilon$  je celkový počet neutronů vzniklých při štěpení na jeden neutron absorbovaný v systému
- $\eta f \varepsilon P_{NL}$  je celkový počet neutronů „uvolněných“, v průměru, na jeden neutron vytvořený v systému při přechozím štěpení

Pravděpodobnost rezonančního úniku  $p$

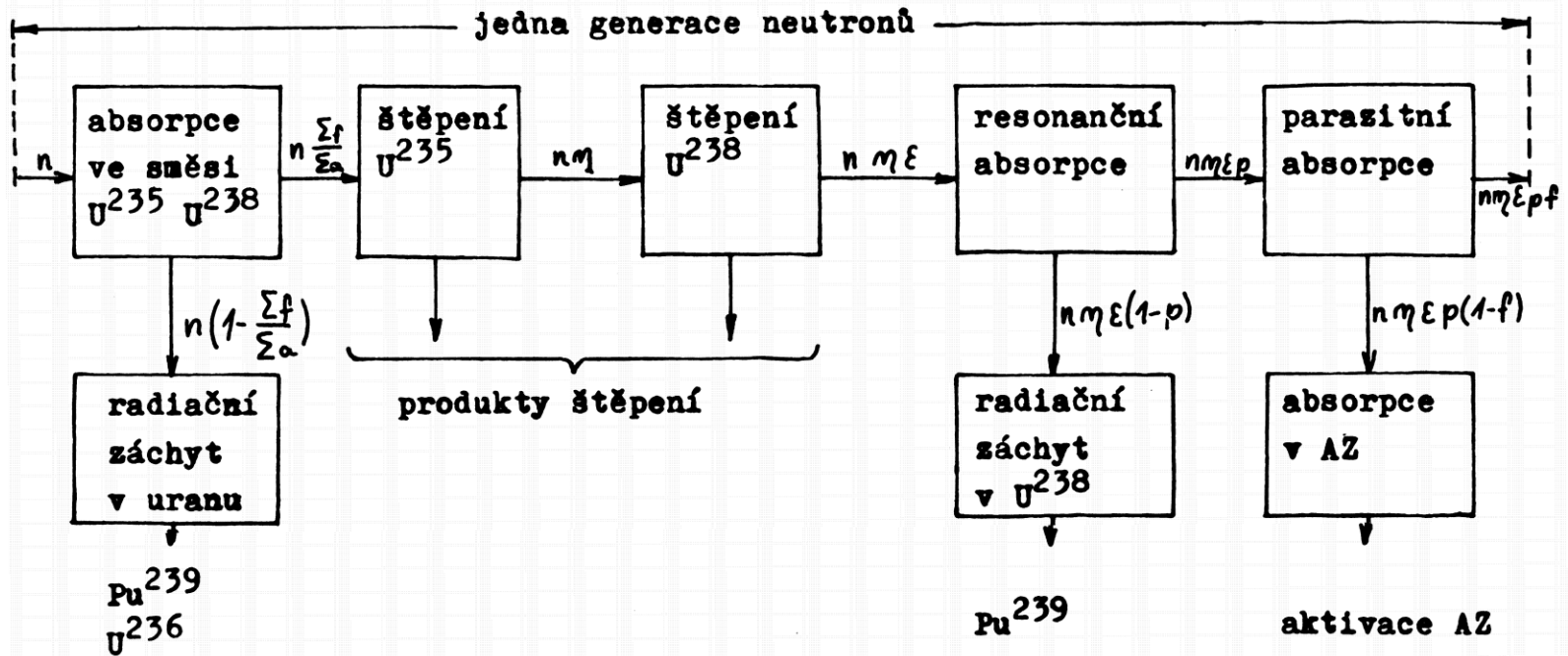
- pst, že neutron není zachycen během zpomalování

# Další koeficienty



# Ilustrace pro U palivo

na konkrétním případě uranového paliva



# Multiplikační faktor

$\eta f \epsilon p P_{NL}$  je celkový počet neutronů uvolněných, v průměru, na jeden neutron vytvořený v systému při přechozím štěpení

- tato veličina je nazývána efektivním multiplikačním faktorem  $k$

$$k = \eta f \epsilon p P_{NL} = k_{\infty} P_{NL}$$

kde  $k_{\infty}$  je multiplikační faktor nekonečného systému s nulovým únikem

- systém můžeme rozdělit na

kritický ( $k=1$ )

podkritický ( $k<1$ )

nadkritický ( $k>1$ )

- pro typický tlakový vodní reaktor je  $\eta \approx 1.65$ ,  $f \approx 0.71$ ,  $\epsilon \approx 1.02$  and  $p \approx 0.87$ , což dává  $k_{\infty} \approx 1.04$ ;  $P_{NL} \approx 0.97$  pro rychlé a 0.99 pro tepelné neutrony  $\Rightarrow k \approx 1.00$

$P_{NL}$  lze ovlivnit změnou velikostí systému, případně vhodnou volbou moderátoru, který stihne n zpomalit než se dostanou příliš daleko – redukce úniku zejména rychlých n

$k_{\infty}$  je odlišné pro homogenní a heterogenní uspořádání systému

pro přírodní uran homogenně v grafitu je  $\eta \approx 1.33$ ,  $f \approx 0.9$ ,  $\epsilon \approx 1.05$  and  $p \approx 0.7$ , což dává  $k_{\infty} \approx 0.88$ ;

pokud je systém nehomogenní, lze dosáhnout až  $p \approx 0.9$

důležité i u těžkovodních reaktorů s přírodním uranem

# Popis neutronové kinetiky

- je-li v systému v čase  $t = 0$ , v systému  $N_0$  n a je-li střední doba života n v systému (čas mezi vznikem a zánikem n)  $l$ 
  - ⇒ počet n v systému v čase  $t = l$  roven  $kN_0$
  - ⇒ v čase  $t = ml$  pak  $k^m N_0$ 
    - $l \approx 10^{-6}$  s v systémech, kde je štěpení vyvoláváno rychlými n
    - $l \approx 10^{-4} - 10^{-3}$  s v systémech, kde je štěpení vyvoláváno tepelnými n
- rovnice řídící neutronovou kinetiku

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{kN(t) - N(t)}{l} + S(t)$$

- pro externí zdroj nezávislý na čase má řešení

$$N(t) = N(0)e^{(k-1)t/l} + \frac{Sl}{k-1} [e^{(k-1)t/l} - 1]$$

- neexistuje stabilní řešení pro  $k > 0$ ; ale pro  $k < 1$  existuje asymptotické řešení

$$N_{\text{asymptotic}} = \frac{lS}{k-1}$$

# Ilustrace pro U - výbuch

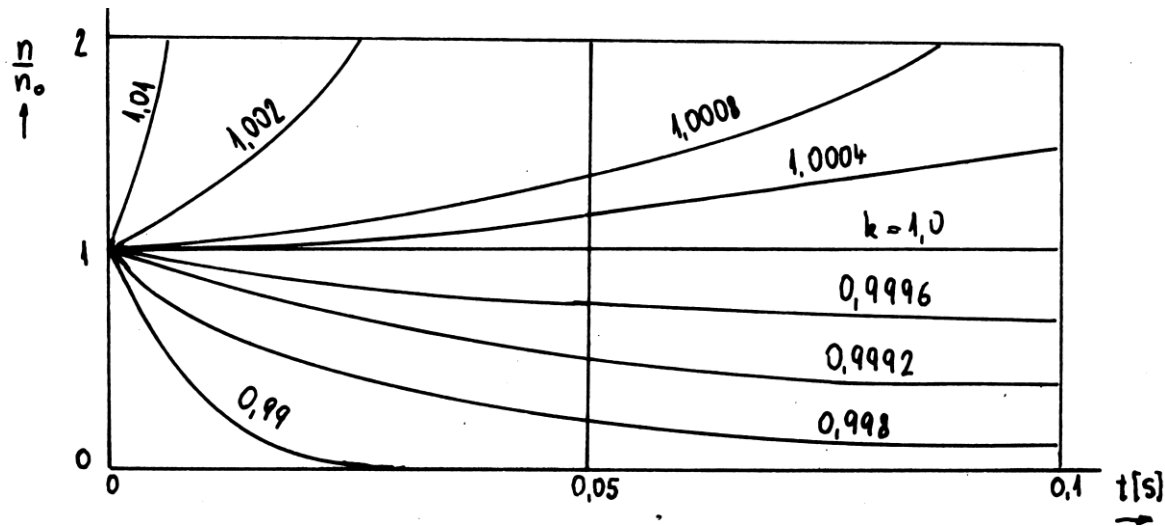
- v prostředí z čistých štěpících se materiálů je doba n cyklu  $\tau \approx 10^{-8}$  s
  - při  $k=1.1$  jeden počáteční neutron způsobí za  $6 \mu\text{s}$  vznik  $10^{26}$  neutronů, tzn.  $10^{26}$  štěpení - taková situace odpovídá štěpení 400 kg uranu za dobu  $6 \mu\text{s}$
- V čistém štěpícím se materiálu, lze řetězovou reakci snadno uskutečnit
  - pro  $^{235}\text{U}$ , zanedbáme-li zpomalení n při nepružných srážkách s jádry uranu, můžeme předpokládat, že n, uskutečňující štěpení, mají energii 2 MeV  $\Rightarrow$  počet druhotných n při této energii je  $\nu = 2.68$ ; radiační záchyt však snižuje koeficient rozmnožení na  $\nu = k = 2.58$  - to vede k poměrně malé kritické hmotnosti

Hmotnosti a poloměry kritických koulí

nuklid	$m_{\text{crit}}$ (kg)	$r_{\text{crit}}$ (cm)
$^{233}\text{U}$	16	6
$^{235}\text{U}$	48	8.5
$^{239}\text{Pu}$	17	6

# Časový vývoj hustoty toku

Časový průběh hustoty toku  $n$  pro různé hodnoty koeficientu multiplikace



- při takto rychlých změnách je reaktor prakticky neurčitelný!
- z praxe ale víme, že reaktor řídit lze
- mohou za to zpožděné  $n$



# Zpožděné neutrony

- existuje více než 50 štěpných produktů, které se rozpadají  $\beta$  s následnou emisí n
- většinou se zavádí 6 pseudoskupin

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$$

$^{235}\text{U}$	
$\tau_i$ (s)	$\beta_i$
0.258	0.000168
0.715	0.000824
3.22	0.00263
8.65	0.00121
31.5	0.00137
78.7	0.000246
$\Sigma \beta_i$	0.006448

$^{239}\text{Pu}$	
$\tau_i$ (s)	$\beta_i$
0.312	0.000073
0.793	0.000216
3.02	0.000687
7.50	0.000452
32.2	0.000584
77.5	0.000080
$\Sigma \beta_i$	0.002092

- pokud by systém pracoval jen s okamžitými n, asi se nedá vůbec uregulovat
- (příznivý) vliv zpožděných n je dán tím, že efektivně prodlouží střední dobu života

$$\bar{l} = (1 - \beta)l + \beta_1\tau_1 + \dots + \beta_6\tau_6$$

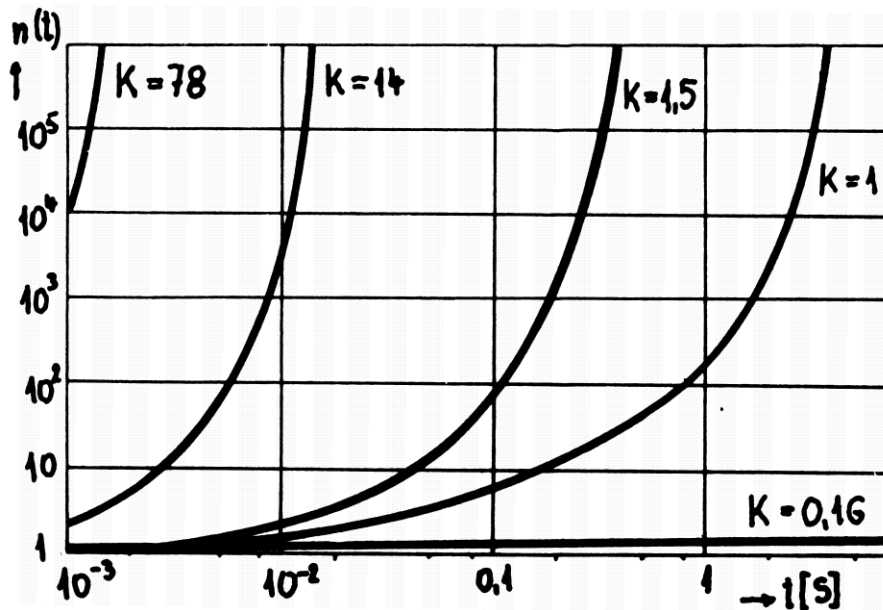
- přestože jsou  $\beta$  malé, hodnoty  $\tau_i$  podstatně prodlouží stř. dobu života – až o 2 řády  
– už umožňuje přiměřenou regulaci

- příklad emise zpožděného n:  $^{87}\text{Br} \xrightarrow[56 \text{ s}]{\beta^-} ^{87}\text{Kr} \xrightarrow{\text{n}} ^{86}\text{Kr}$

# Zpožděné neutrony - ilustrace

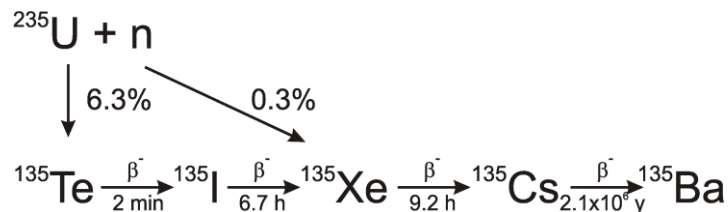
- zpožděné n příznivě ovlivňují délku ustálené periody a umožňují regulaci reaktoru za předpokladu, že  $1 < k < 1 + \beta$

odezva na skokovou změnu reaktivity



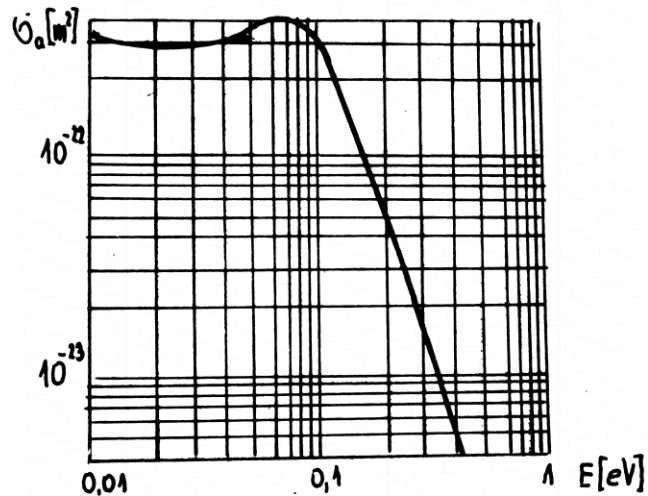
# Otrava, zastruskování reaktoru

- Výsledkem štěpení těžkých jader je vznik velkého počtu produktů s různými  $\sigma$
- některé mají extrémně vysoký  $\sigma$  pro absorpci termálních n
- $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{155}\text{Eu}$ ,  $^{157}\text{Gd}$ ,  $^{113}\text{Cd}$
- působení těchto absorbátorů je velice silné a nelze ho provést globálně jako u ostatních prvků
- absorpce stabilními, nebo dlouhodobými isotopy – zastruskování
- absorpce krátkodobými isotopy - otrava
- otravu způsobuje prakticky jen  $^{135}\text{Xe}$ , který má pro tepelné n vůbec největší  $\sigma$  pro absorpci ( $3.5 \times 10^6$  b)
  - tvoří se s výtěžkem 0.3% + následujícím procesem
  - úbytek Xe: rozpadem, nebo absorpcí n (silně závislé na n toku)

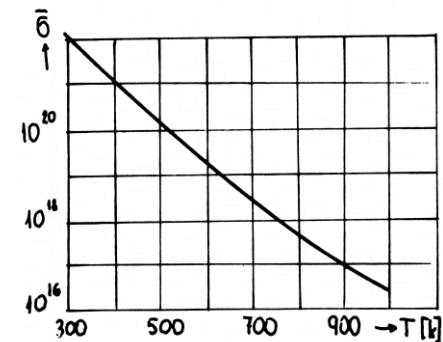


# $^{135}\text{Xe}$

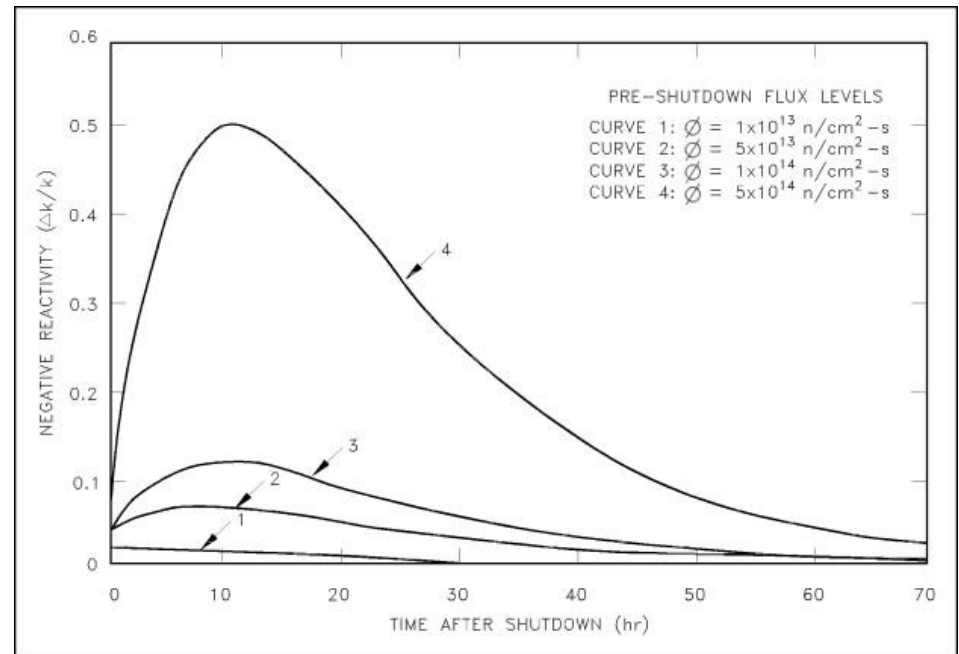
závislost absorpčního  $\sigma(^{135}\text{Xe})$   
na energii



střední absorpční  $\bar{\sigma} (^{135}\text{Xe})$  ja funkce  
teploty pro maxwellovské spektrum



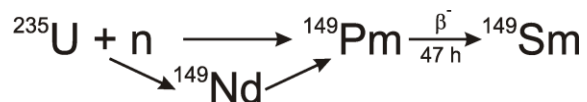
časová změna reaktivity vlivem  
 $^{135}\text{Xe}$  po vypnutí reaktoru



# Zastruskování reaktoru

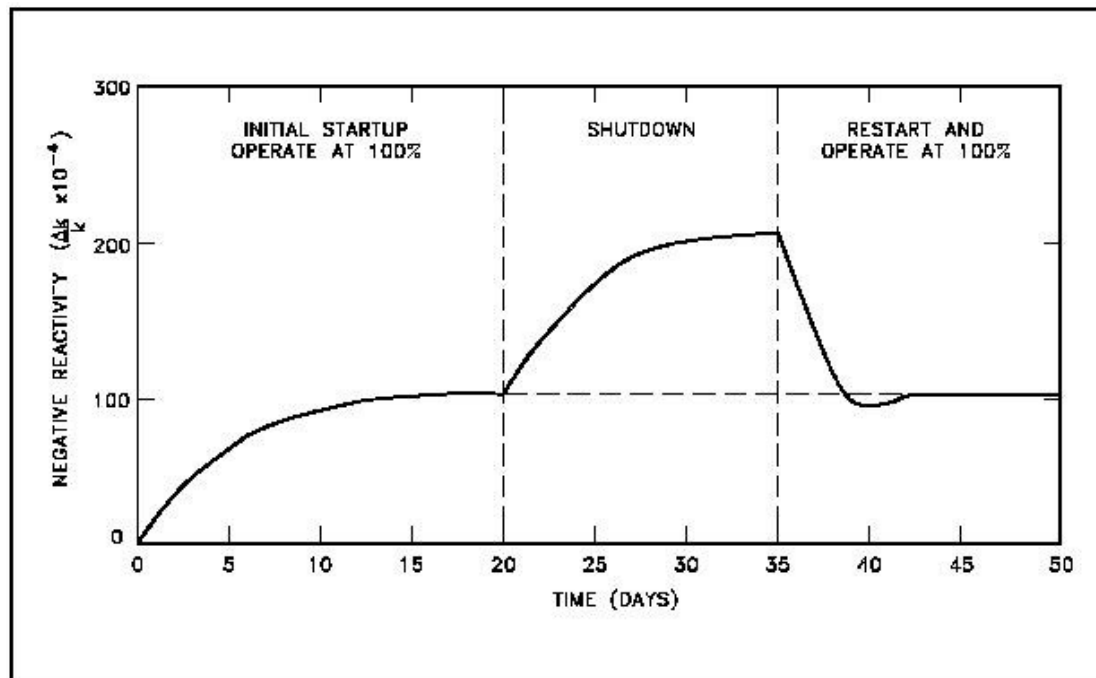
- Vedle silných absorbátorů s krátkou dobou života je nutno počítat i s dlouho žijícími isotopy

- nejvýznamější struskou je  $^{149}\text{Sm}$



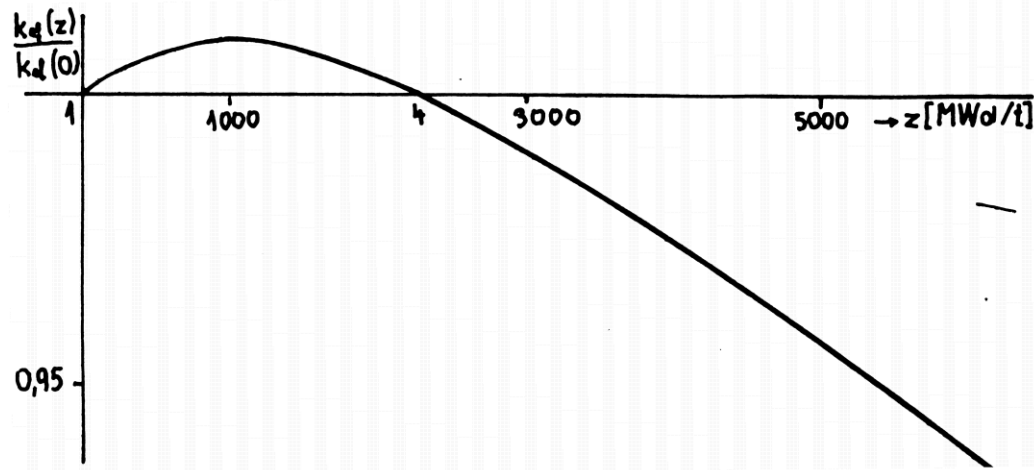
struska	výtěžek (%)	$\sigma$ (b)
$^{113}\text{Cd}$	0.014	19 500
$^{149}\text{Sm}$	1.3	$6.82 \times 10^4$
$^{151}\text{Sm}$	0.445	70 000
$^{155}\text{Eu}$	0.03	$1.4 \times 10^4$
$^{157}\text{Gd}$	0.015	$1.6 \times 10^5$

chování  $^{149}\text{Sm}$  v typickém lehkovodním reaktoru



# Závislost $n$ bilance na vyhoření

charakteristická závislost  $k$  na efektivní době pro lehkovodní reaktor



- 3 různé druhy absorbátorů mají následující funkce
- kompenzační tyče – pomalé (regulují jen „dlouhodobé změny“)
- regulační tyče – dorovnávají změny „neklidné“ hladiny  $n$   
poměrně rychlé zasouvání/vysouvání (0.3 - 2.2 m/s)
- havarijní tyče – reagují na velmi rychlé změny  
v dobře navrženém systému by prakticky nemělo nastat  
musí být velice rychlé

# Kinetika uran thoriových cyklů

- $^{232}\text{Th}$  se poměrně hojně vyskytuje v zemské kůře a může sloužit jako plodící materiál pro  $^{233}\text{U}$  (počítá se s ním pro budoucnost)

- $^{233}\text{U}$  má velice vhodné vlastnosti pro štěpení:

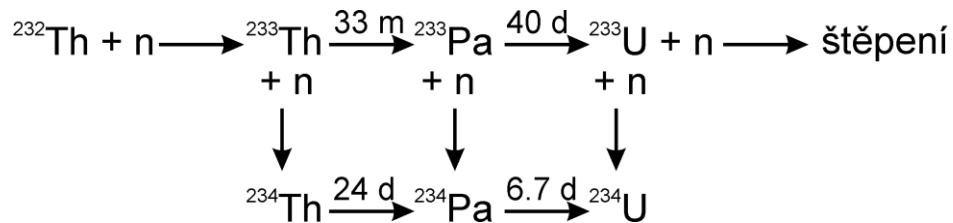
$$\sigma_f = 524 \text{ b}$$

$$\sigma_a = 593 \text{ b}$$

$$\eta = 2.31 \quad (\eta(^{235}\text{U}) = 2.08)$$

na jedno štěpení vzniká 2.61 n

- schéma přeměny Th na U:



# Co je to reaktor?

- zařízení s řízenou řetězovou reakcí štěpení
- část reaktoru, která obsahuje štěpný materiál a ve které probíhá řetězová reakce štěpení, se nazývá **aktivní zóna**



# Skladba jaderného reaktoru

## Základních části standardního reaktoru

- **palivo**
  - dochází v něm ke štěpení a uvolňuje se energie
- **moderátor**
  - pomocí srážek neutronů s jádry atomů snižuje kinetickou energii neutronů
- **chladio**
  - tekutina odvádějící vznikající tepelnou energii ven z reaktoru
- **stavební materiály**
  - tvoří ochranný obal paliva a moderátoru a dále vnitřní vestavby reaktoru
- **reflektor**
  - část reaktoru přiléhající k aktivní zóně a sloužící k odražení co největšího počtu unikajících neutronů zpět do aktivní zóny
- **regulační a ovládací zařízení**
  - absorpcí neutronů umožňují udržovat výkon reaktoru na žádané hodnotě
- **ochranný kryt**
  - chrání obsluhu reaktoru před zářením vznikajícím v rektoru

# Skladba jaderného reaktoru (II)

## Kontejment

- primární okruh a další bezpečnostní a pomocná zařízení - jsou uzavřeny v ochranné obálce nazývané kontejment
  - jsou vybaveny ventilem s radiačními filtry - po havárii lze přetlakovanou páru vypouštět kontrolovaně do ovzduší s tím, že naprostá většina RA látek bude zachycena na filtrech

## Primární okruh

- soubor zařízení, jejichž úkolem je řídit štěpnou řetězovou reakci a odvádět teplo při ní vznikající; hlavní částí primárního okruhu je reaktor

## Sekundární okruh

- soubor zařízení, která přeměňují pohybovou energii páry na energii elektrickou; nejsou zde jaderná zařízení a nevyskytují se zde ani RA látky

## Chladicí okruh

## Dieselgenerátorová stanice

- Pro případ ztráty hlavního i rezervního elektrického napájení vlastní spotřeby je elektrárna vybavena nouzovými zdroji elektrické energie

# Klasifikace jaderných reaktorů (I)

lze klasifikovat podle řady hledisek

- podle způsobu využití
  - školní účely, výzkum, výroba radioisotopů, pohon lodí, výroba energie pro účely energetické a teplárenské, pro chemickou výrobu,...
  - většinou víceúčelové
- podle schopnosti reprodukovat palivo
  - konvertor – produkuje nový štěpitelný materiál
  - breeder – pokud vyrobí více štěpného materiálu než sám spotřebuje
  - burner – nepodílí se na produkci paliva
- podle energie  $n$  vyvolávajících štěpení
  - rychlý reaktor –  $E_n > 100 \text{ keV}$
  - tepelný reaktor – používá termální energii  $n$
  - epitermální (rezonanční) reaktor – používá  $n$  s energiemi  $1 - 1000 \text{ eV}$  (řídké)

# Klasifikace jaderných reaktorů (II)

- podle uspořádání
  - homogenní reaktor – palivo s moderátorem tvoří homogenní roztok nebo směs
  - heterogenní reaktor – palivo od moderátoru prostorově odděleno
- základní fyzikální koncepci aktivní zóny určuje
  - druh použitého paliva a jeho chemická vazba
  - moderátor
  - chladivo
- existuje řada kombinací, ale jen některé jsou fyzikálně možné a jiné technicky, či ekonomicky vhodné
- prozatím se používá výhradně uran-plutoniový palivový cyklus a obstály kombinace moderátor-chladivo:
  - grafit-plyn, grafit-lehká voda, lehká voda-lehká voda, těžká voda-těžká voda  
+ u rychlých reaktorů chlazení sodíkem
- pro perspektivní Th-U cyklus se uvažuje o kombinacích
  - grafit-plyn, grafit-tavené soli, lehká voda-lehká voda

# Poznámky ke chladivu

- většina reaktorů pracuje s takovým výkonem, že je nutno reaktor chladit
- požadavky na chladiivo reaktoru
  - musí mít příslušné tepelné vlastnosti
  - nesmí korodovat konstrukční materiál reaktoru
  - musí být stabilní vůči ozařování
  - především však, aby chladiivo mělo malý účinný průřez pro záchyt neutronů
- chladiiva, která těmto účelům vyhovují
  - plyn ( $\text{CO}_2$ , He) - účinný teprve při vyšším tlaku (větším než 1 MPa)
  - voda
  - těžká voda
  - tekuté kovy
  - tekuté kovy, např. Na, Pb, Bi a K - používají se v energetických reaktorech, kde je požadována vysoká pracovní teplota

# Poznámky k palivu (U)

- kovový U je z hlediska svých vlastností velmi špatným materiálem pro využití v energetickém reaktoru
  - hlavní nevýhodou je to, že při teplotě  $665^{\circ}\text{C}$  u něho dochází k přeměně spojené se závažnou změnou objemu za vzniku trhlin a dutin
  - proto se kovový uran nahradil jeho slitinami s kovy málo pohlcujícími neutrony, ale především jeho kysličníky ( $\text{UO}_2$ )
  - ve slitinách s uranem se nejlépe hodí Zr, neboť se zvětšením pevnosti posouvá teplotu přeměny na technicky využitelnou výši
  - **obohacení uranu** může být
    - nízké (do 5%)
    - střední (do 20%)
    - vysoké (do 93%).
- kovové Pu je ještě nevýhodnější než U, zejména pro svůj relativně nízký bod tavení ( $637^{\circ}\text{C}$ )
  - problematika plutonia jakožto jaderného paliva není ještě dořešena do té míry, aby jej bylo možné používat ve stejném měřítku jako uranu.

# Poznámky k uspořádání

- někdy se lze setkat nejen s rozdělením na homog. a heterog. reaktor, ale i
- podle konstrukce primárního okruhu
  - **větvový** - chladivo z reaktorové nádoby proudí několika větvemi do výměníku
  - **integrální**, kdy aktivní zóna spolu s tepelným výměníkem jsou umístěny v téže reaktorové nádobě
- podle uspořádání paliva (u heterogenních reaktorů)
  - **reaktor s tlakovou nádobou** - aktivní zóna a celý systém řízení reaktoru jsou umístěny v tlakové nádobě, která snáší potřebný tlak
  - **reaktor kanálového typu** - každý palivový článek je umístěn ve vlastní tlakové trubce
- podle změny skupenství chladiva (je-li chladivem  $H_2O$ , či  $D_2O$ )
  - **varný reaktor** - v reaktoru dochází k varu a výrobě páry
  - **tlakovodní reaktor** - reaktor pracuje s vodou v kapalném skupenství

# Moderátor

- pro práci jaderných reaktorů s tepelnými n má velký význam moderátor
- rychlé n, vznikající při štěpení, se postupně zpomalují při srážkách s jádry moderátoru
- pro popis zpomalování n se zavádí průměrný pokles přirozeného logaritmu energie neutronu při jedné srážce, tzv. **průměrný logaritmický dekrement energie** na jednu srážku
  - je to (střední) hodnota veličiny  $\xi = \ln(E/E')$
  - za velmi dobré přiblížení (s chybou do 5%) můžeme považovat vztah  $\xi = \frac{2}{A + 2/3}$
  - čím větší hodnota  $\xi$ , tím menší průměrný počet srážek na zpomalení
- moderátor by však neměl n zachycovat, musí být tedy zároveň velký  $\Sigma_s \Rightarrow$  zavádí se **zpomalovací schopností**  $\xi\Sigma_s$
- zpomalovací schopnost však nezahrnuje ještě jeden důležitý faktor a tím je, že látky mohou n také absorbovat - jakákoli látka, která silně absorbuje neutrony, nemá jako moderátor význam
- zavádí tzv. **koeficient zpomalení** (moderace)  $(\xi\Sigma_s)/(\Sigma_a)$ 
  - tento koeficient je pak nejdůležitější veličinou, charakterizující vlastnosti moderátoru



# Charakteristiky některých moderátorů

moderátor	$\xi$	$h$	$\Sigma_s$ (b)	$\Sigma_a$ (b)	$\xi\Sigma_s$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a$
H <sub>2</sub> O	0.920	20	164	2.2	153	71
D <sub>2</sub> O	0.509	36	35	0.0032	18	5670
Be	0.209	88	74	0.11	16	150
BeO	0.173	105	66	0.062	11	180
C	0.158	114	39	0.033	6.3	192
H	1.0	18				
D	0.725	25				
He	0.425	43				83
Na	0.084	217				1134
Fe	0.035	520				35
<sup>238</sup> U	0.008	2170				0.0092

počet srážek nutných na zpomalení (ze 2 MeV na tepelnou energii)  $h = \frac{\ln\left(\frac{2 \times 10^6}{0.025}\right)}{\xi}$

# Reflektor

## Jaká látka by měla tvořit reflektor?

- jednou z vlastností reflektoru by měla být co největší schopnost odrazet neutrony zpět do rozmnožujícího prostředí - aby se neutron mohl vrátit zpět, musí se co nejdříve srazit s jádrem reflektoru.
  - dále potřebujeme, aby v prostředí reflektoru nebyl neutron pohlcován, tedy aby se neutron mohl vrátit z co největší hloubky reflektoru
- ⇒ je vidět, že látky, které jsou dobrými moderátory, budou i dobrými reflektory

# U - vhodnost ke štěpné reakci (I)

- přírodní uran je prakticky monoizotop - obsah štěpícího se izotopu uranu  $^{235}\text{U}$  je velmi malý  $\Rightarrow$  nelze v samotném přírodním uranu uskutečnit řetězovou reakci

$^{234}\text{U}$	0.006%
$^{235}\text{U}$	0.714%
$^{238}\text{U}$	99.280%

- třebaže účinný průřez pro štěpení  $^{238}\text{U}$  je při  $E_n \sim 2 \text{ MeV}$  dost velký, nemůže  $^{238}\text{U}$  udržovat řetězovou reakci - při snižování  $E_n$  totiž  $\sigma$  prudce klesá a při  $E_n < 1 \text{ MeV}$  je  $\sigma \sim 0$
- část  $n$  ze štěpení má energii menší než  $1 \text{ MeV}$  - ty nemohou vyvolat další štěpení
- $n$  s  $E_n > 1 \text{ MeV}$  se při srážkách s jádry  $^{238}\text{U}$  nejčastěji pouze pružně nebo nepružně rozptýlí a nevyvolávají štěpení ( $\sigma_s > \sigma_f$ ) - prakticky každá nepružná srážka vede ke snížení  $E_n$  pod hodnotu prahové energie štěpení uranu  $^{238}\text{U} \Rightarrow$  pouze 10%  $n$  štěpí jádra  $^{238}\text{U}$ , dříve než se zpomalí pod energii štěpení
- pro  $E_n < 1 \text{ MeV}$  může řetězovou reakci udržovat pouze  $^{235}\text{U}$
- bohužel, při snižování  $E_n$  vzroste  $\sigma_\gamma$  v  $^{238}\text{U}$  rychleji než  $\sigma_f$  v  $^{235}\text{U} \Rightarrow$  při malé koncentraci  $^{235}\text{U}$  v přírodním U dochází hlavně k radiačnímu zachytu  $n$  v  $^{238}\text{U}$
- v přírodním U bude tedy  $k_\infty < 1$  a jedničky může dosáhnout pouze při obohacení uranu izotopem  $^{235}\text{U}$  nad asi 5%

## U - vhodnost ke štěpné reakci (II)

- řetězová reakce však může být dosažena i jiným způsobem, a to ve směsích přírodního nebo slabě obohaceného uranu s moderátory neutronů
- při dostatečně velké koncentraci atomů moderátoru ve směsi jsou neutrony zpomaleny na tepelné dráze, než by mohly být zachyceny v  $^{238}\text{U}$
- zatímco při vysokých energiích se účinné průřezy absorpce ( $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma$ ) v  $^{235}\text{U}$  a  $^{238}\text{U}$  liší jen několikrát, při tepelných energiích se liší 250x  $\Rightarrow$  izotop  $^{235}\text{U}$  (i při své malé koncentraci) absorbuje n s vyšší pravděpodobností než  $^{238}\text{U}$
- takto může být dosaženo  $k = 1$  i při použití přírodního U ve směsích s  $\text{D}_2\text{O}$ , Be, či grafitem
- nejekonomičtější možností je obohacení uranu na 2 až 4%  $^{235}\text{U}$  a jako moderátor použít lehkou vodu

