

Kvantová, atómová a subatómová fyzika

Využitie energie jadra

Štiepenie jadra: história

tepelné neutróny: nie sú odpudzované Coulombovskou silou, ľahké ostreľovanie jadra
ostreľovaním uránu tepelnými neutrónmi ($E = 0,04 \text{ eV}$, $E=kT$) sa objavuje množstvo nových
rádioaktívnych nuklidov (Hahn, Meitner, Straßmann), objavilo sa bárium (1938)

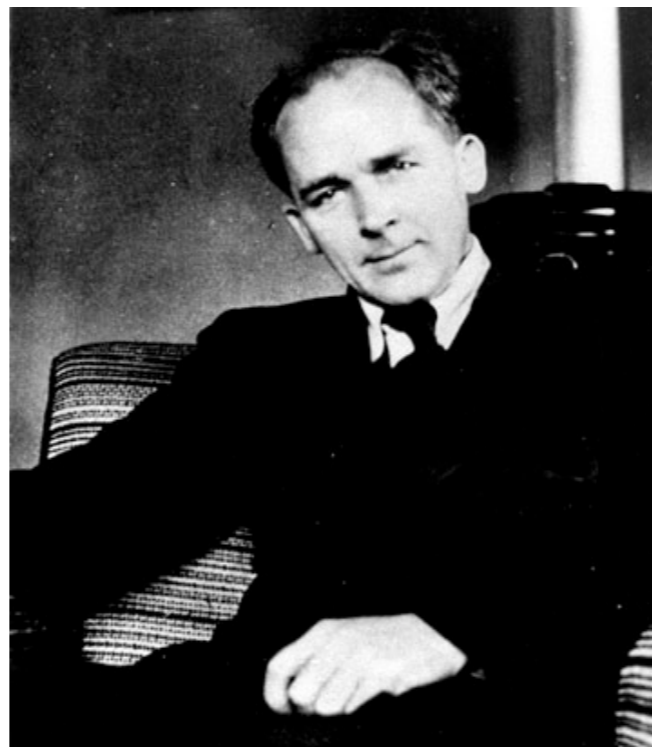
Meitner a Frisch (1939): urán sa po absorpcii jedného neutrónu **štiepi** na ľahšie prvky

Otto Hahn: Nobelova cena 1944



Otto Hahn

Lise Meitner



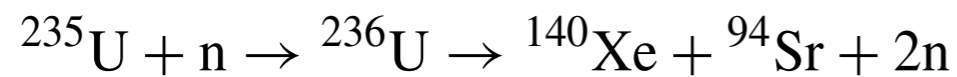
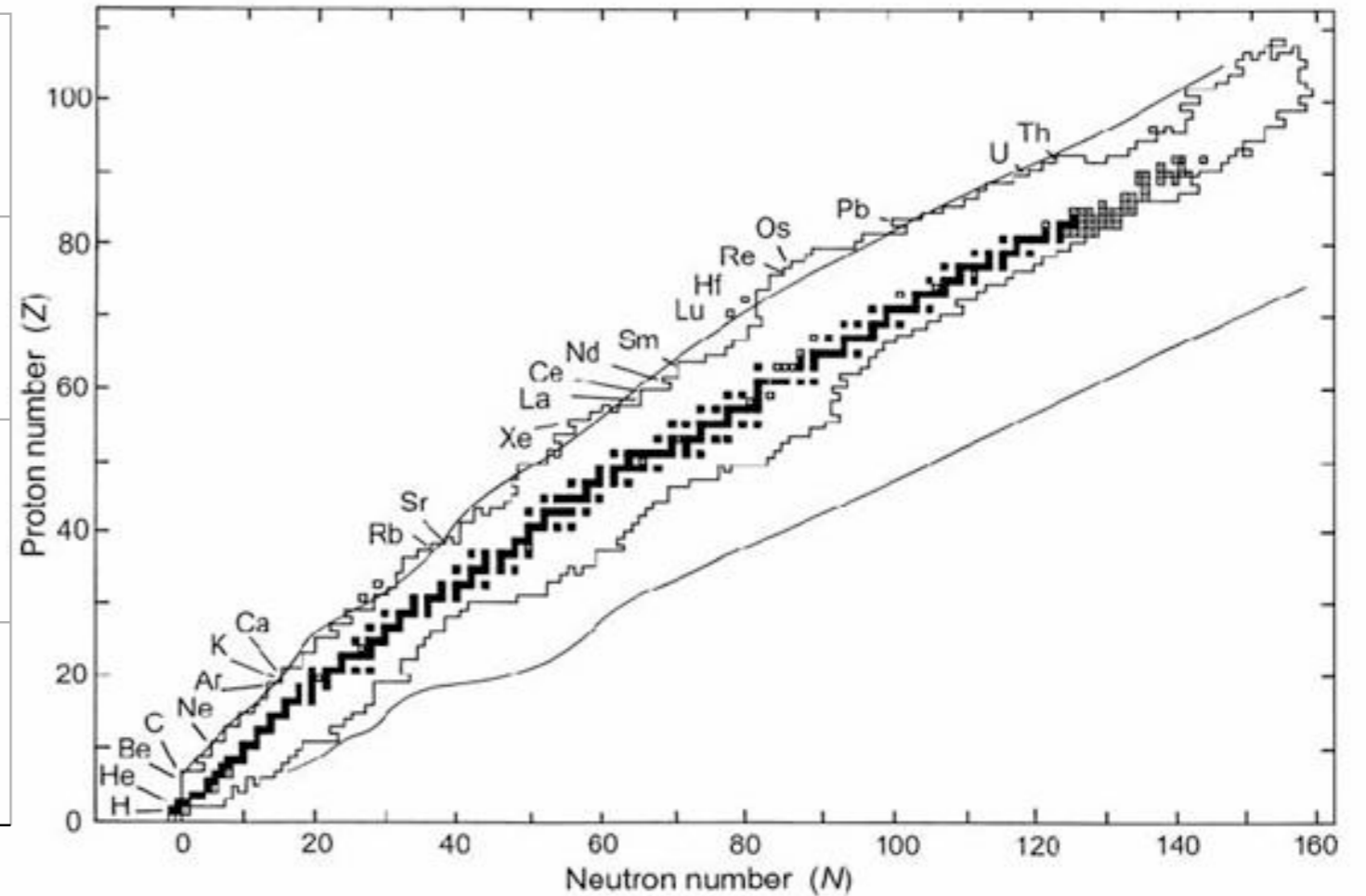
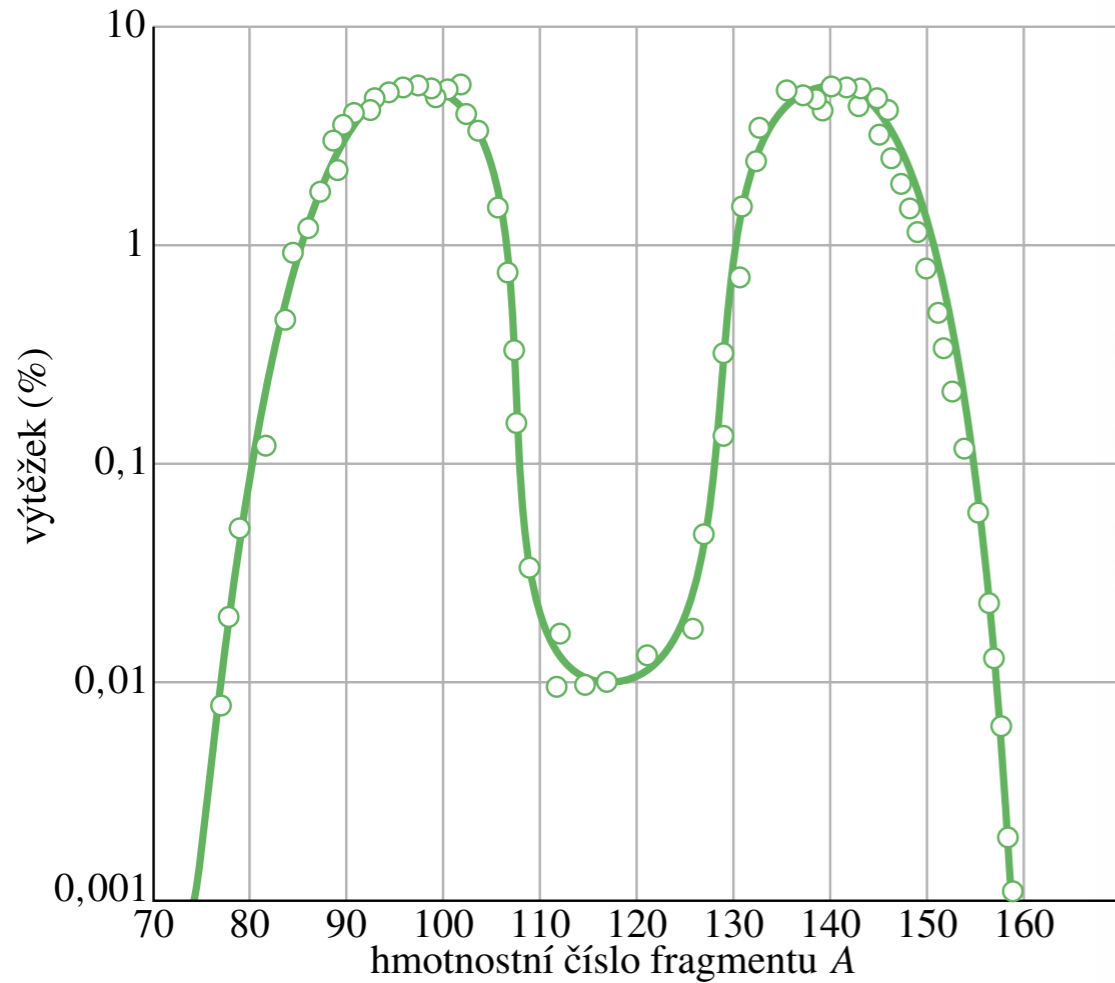
Fritz Straßmann



Otto Robert Frisch

Štiepenie jadra: detailnejší pohľad

rozpadom prechodového **zloženého jadra** vznikajú nuklidy bohaté na neutróny, ktoré sa menia β rozpadmi

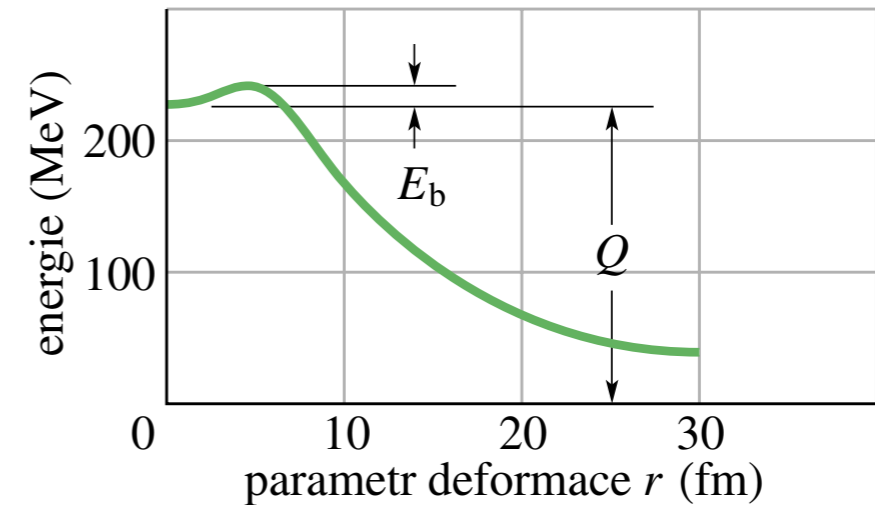
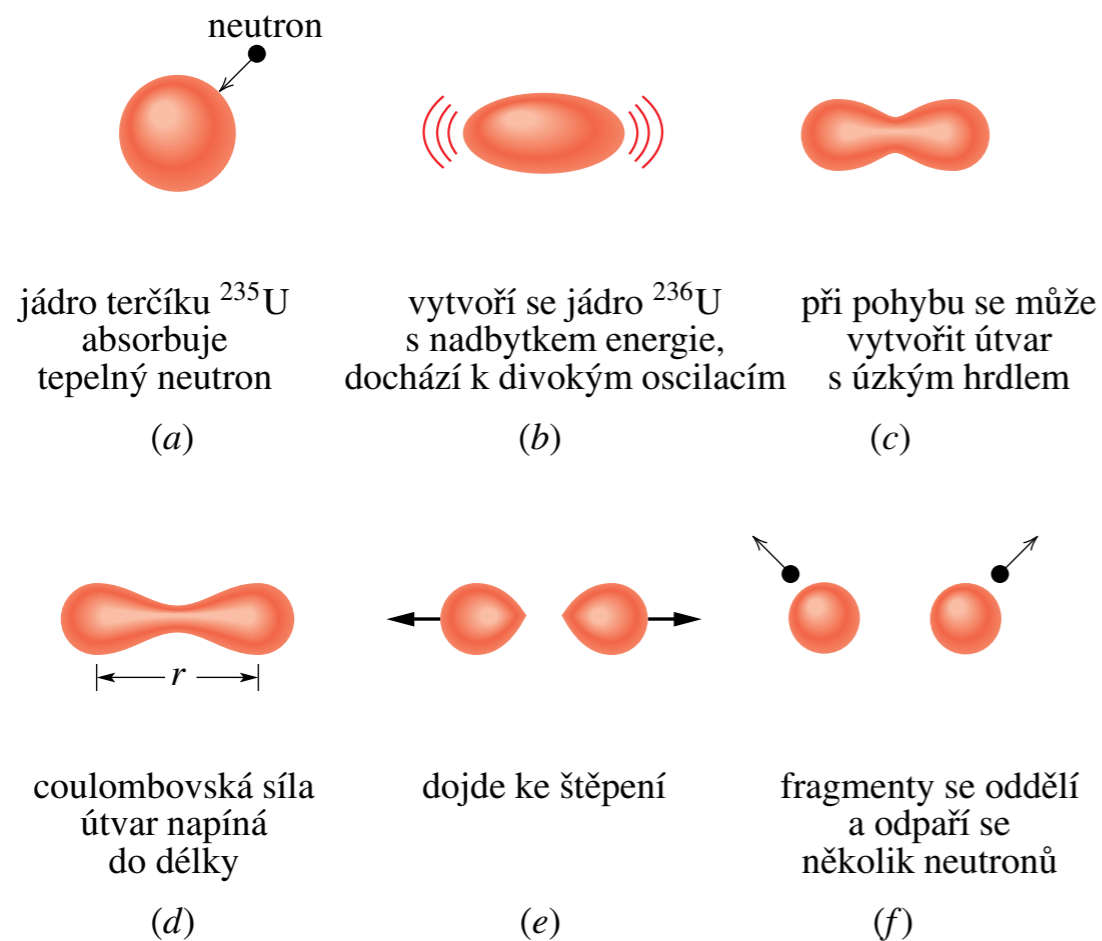


	^{94}Sr	\rightarrow	^{94}Y	\rightarrow	^{94}Zr
τ	75 s		19 min		stabilní
Z	38		39		40

	^{140}Xe	\rightarrow	^{140}Cs	\rightarrow	^{140}Ba	\rightarrow	^{140}La	\rightarrow	^{140}Ce
τ	14 s		64 s		13 d		40 h		stabilní
Z	54		55		56		57		58

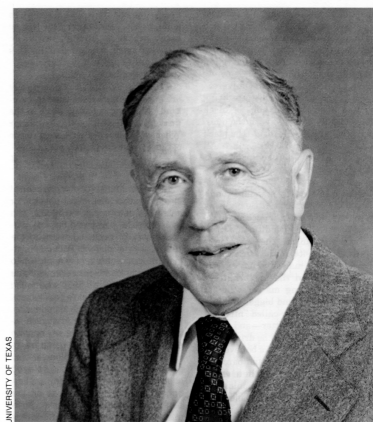
Štiepenie jadra: Bohrov-Wheelerov (kvapkový) model

- tepelný neutrón excituje jadro na vyššiu energetickú hladinu
- jadro môže pretunelovať alebo prekonať bariéru spojenú so silnou deformáciou až rozdelením



NUKLID TERČE	ŠTĚPENÝ NUKLID	E_n (MeV)	E_b (MeV)	ŠTĚPENÍ TEPELNÝMI NEUTRONY?
^{235}U	^{236}U	6,5	5,2	ano
^{238}U	^{239}U	4,8	5,7	ne
^{239}Pu	^{240}Pu	6,4	4,8	ano
^{243}Am	^{244}Am	5,5	5,8	ne

John Archibald Wheeler



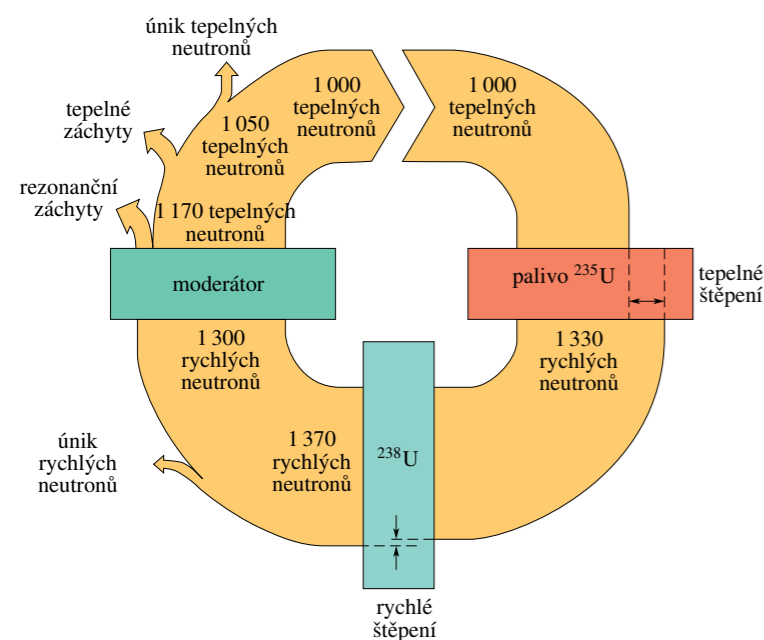
Jadrový reaktor

neutróny emitované pri štiepení indukujú (po spomalení) ďalšie štiepne reakcie:
reťazová reakcia

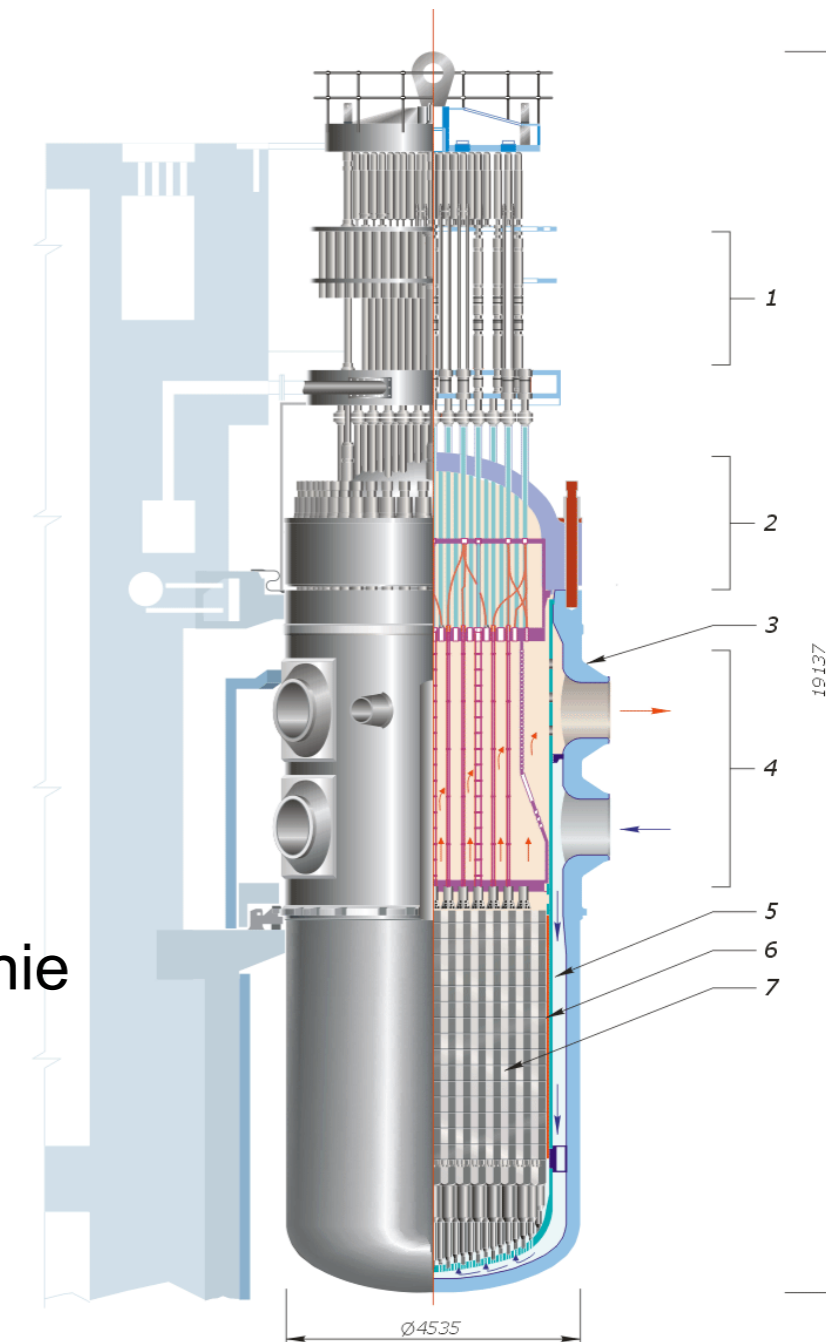
funguje len s ^{235}U , ktorého je obvykle len 0,7%
⇒ zvýšenie koncentrácie na 3%: **obohacovanie uránu**

Technické problémy:

1. únik neutrónov - úmerný povrchu, treba nadkritické množstvo
2. príliš vysoká (nie tepelná) energia emitovaných neutrónov - treba spomaliť: **moderátor** (napr. voda)
3. (rezonančný) záchyt spomalovaných neutrónov: geometria usporiadania s palivovými tyčami obklopenými moderátorom



násobiaci faktor k : pomer počtu neutrónov indukujúcich štiepenie ku počtu neutrónov indukujúcich štiepenie v ďalšej generácii
kritický režim: $k = 1$
plán reaktora: $k > 1$, regulácia regulačnými tyčami (Cd)



reaktor VVER

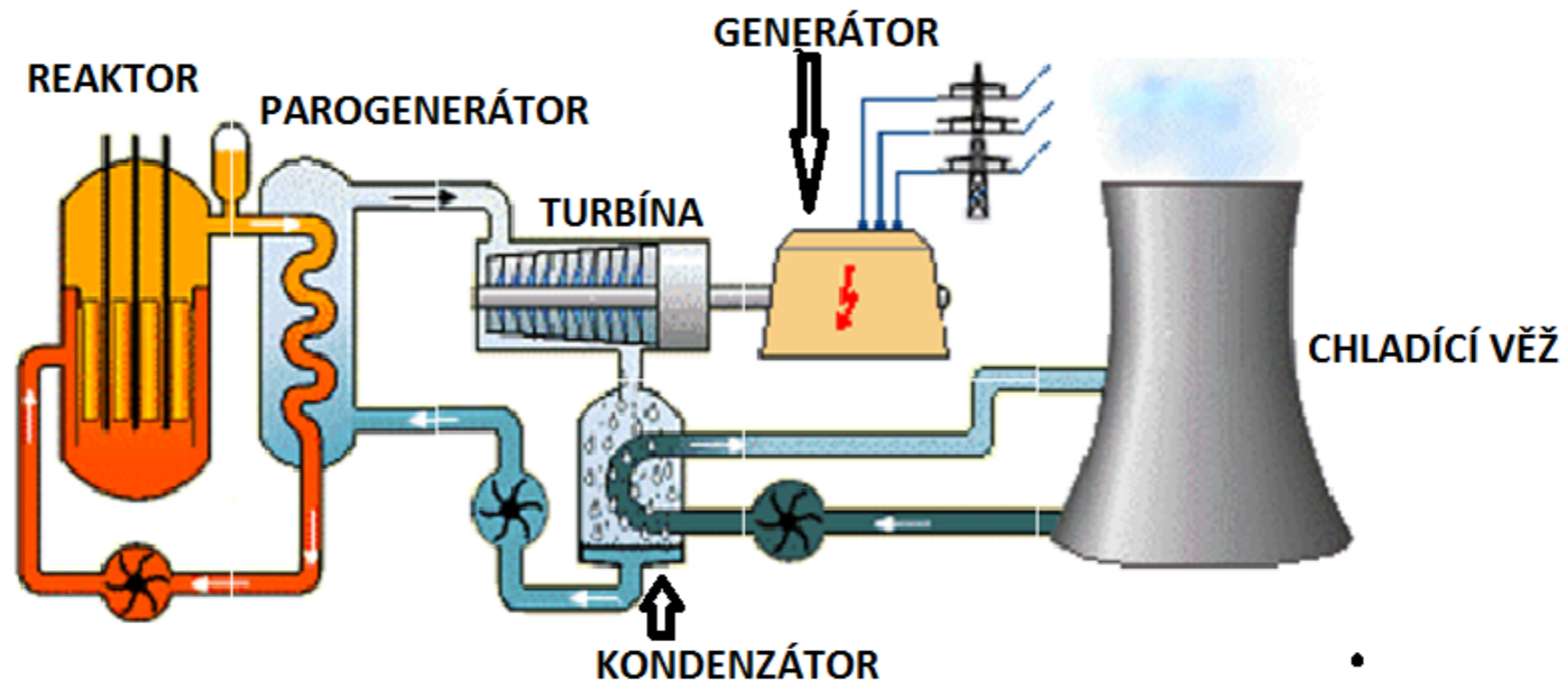
Typy jadrových reaktorov: VVER

odlišnosti sú v:

- rýchlosti neutrónov (tepelné alebo rýchle)
- chladiacom médiu (ľahká voda, ťažká voda, roztavená soľ)
- moderátore (voda, grafit, ...)

VVER / PWR (vodo-vodný energetický reaktor, pressurised water reactor)

- ľahká voda ako moderátor aj chladiace médium, primárny okruh pod tlakom, teplota okolo 300 °C
- obohatený urán na 3,1 - 4,4% ^{235}U (pre VVER 1000 - Temelín)
- najrozšírenejší typ reaktora (včítane AO Mochovce)

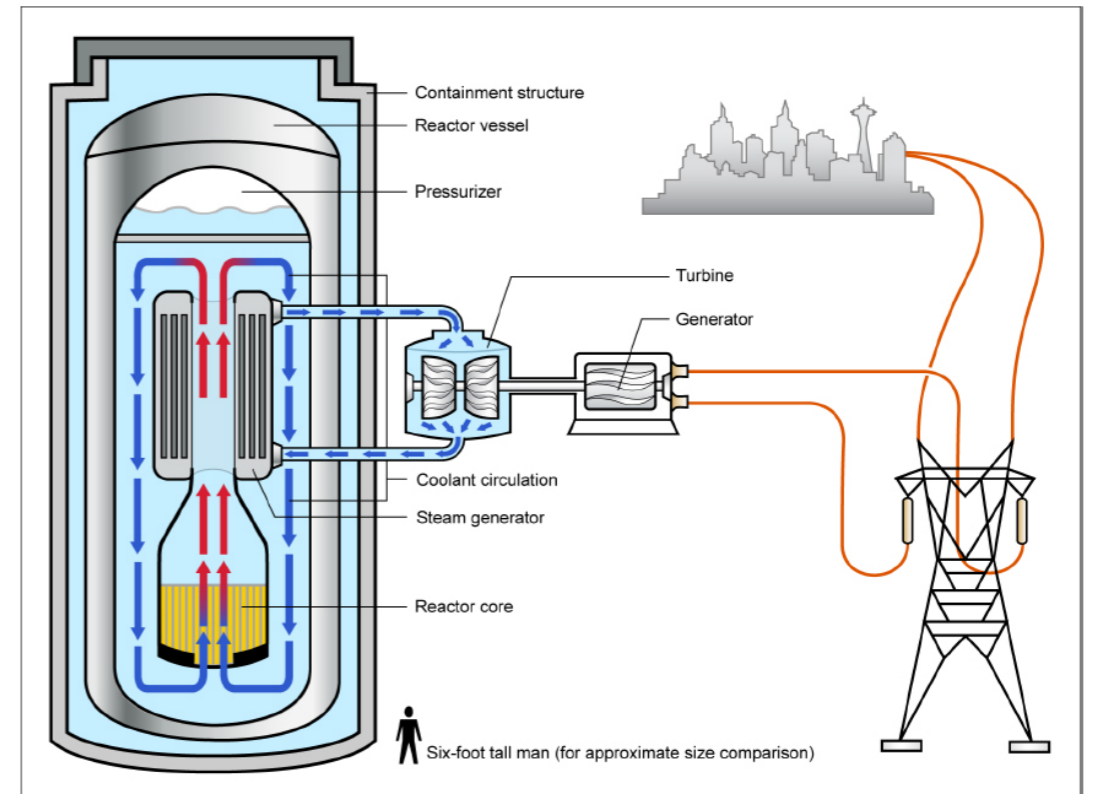


Ďalšie typy reaktorov (vybrané)

- varný reaktor / BWR (boiling water reactor)
ľahká voda chladí aj moderuje, v primárnom okruhu vrie a para poháňa priamo turbínu
- CANDU (Canada Deuterium Uranium)
chladenie aj moderovanie ťažkou vodou (menšie pohlcovanie neutrónov), využíva prírodný urán
- kanálový varný reaktor s uránovo-grafitovým moderátorom (typ RBMK)
 - chladiace médium voda (varný typ)
 - moderátor grafit (v inertnej atmosfére)
 - veľké rozmery a výkon
 - plodivý/množivý reaktor (vzniká plutónium)
 - Černobyl'
- (Rýchly) množivý reaktor (FBR - fast breeder reactor)
 - reaktor vyrába viac štiepneho materiálu ako spotrebuje
 - využíva štiepenie rýchlymi neutrónmi (nemá moderátor)
 - palivom môže byť zmes plutónia a uránu
 - chladenie tekutým kovom (lebo voda absorbuje neutróny)
- reaktor založený na roztavenej soli
 - experimentálny koncept,
 - palivo zmiešané s tekutou soľou, ktorá slúži na chladenie
 - efektívne využitie neutrónov

Malé modulárne reaktory (SMR)

- Reaktor do 300 MWe
- Skompletovaný so výroby a inštalovaný na mieste (namiesto kompletácie zariadenia na stavbe)
- Redukcia nákladov
- Posilnenie bezpečnosti - pasívna bezpečnosť a jednoduchšia obsluha
- Plávajúca jadrová elektráreň "Akademik Lomonosov"



Source: GAO, based on Department of Energy documentation. | GAO-15-652



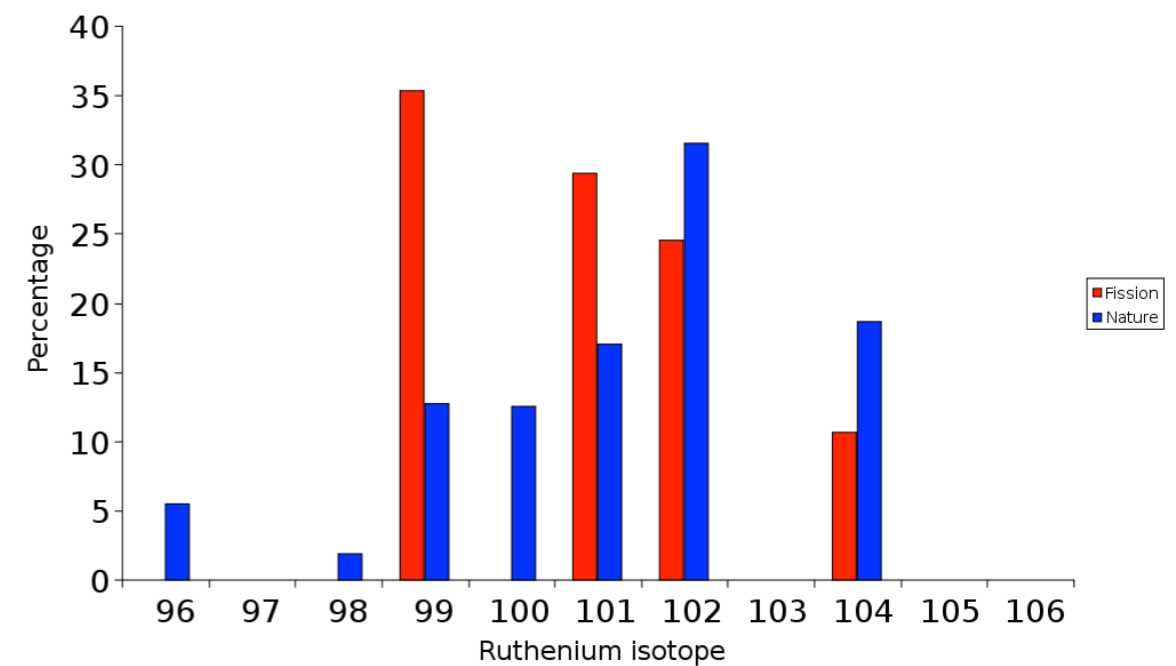
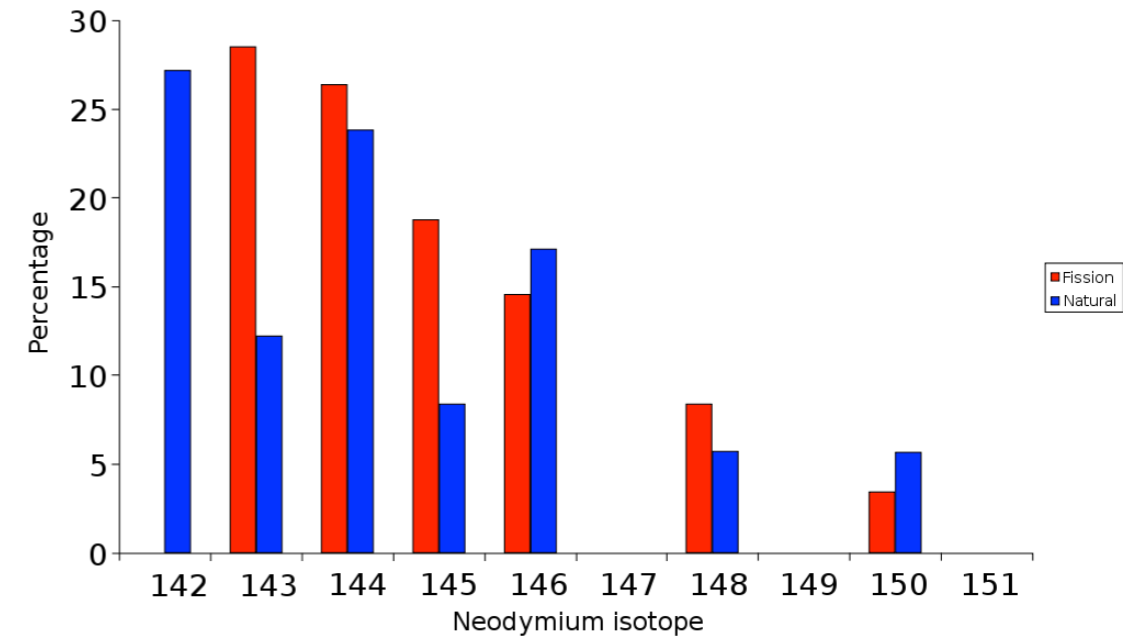
Prírodný jadrový reaktor

Oklo, Gabun, pred zhruba 2 mld rokov



evidencia:

- veľmi malá koncentrácia ^{235}U
- izotopové zloženie neodýmu a ruthénia



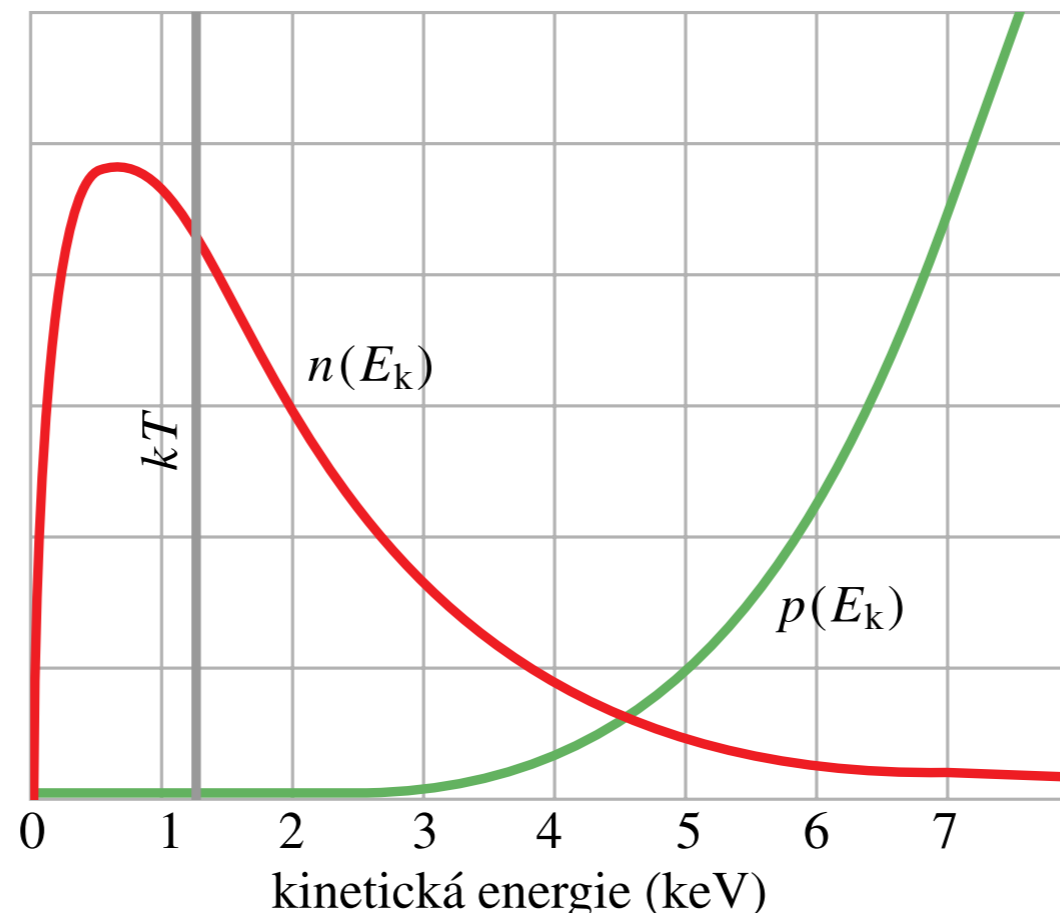
Termojadrová fúzia

pre ľahké prvky ($A < 56$) je zlúčenie jadier exotermická reakcia, treba však prekonať Coulombovské odpudzovanie, toto je možné pri veľmi vysokej teplote

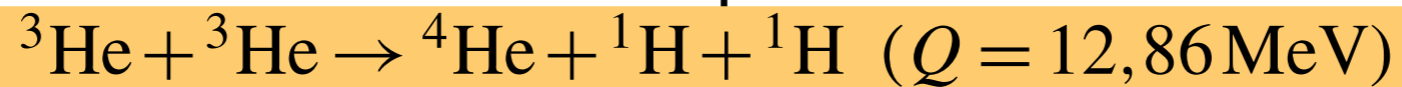
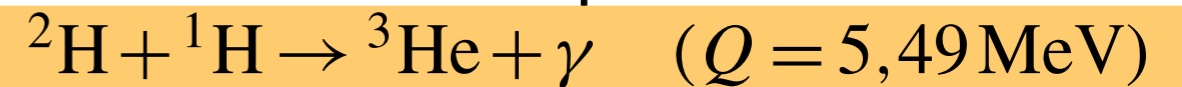
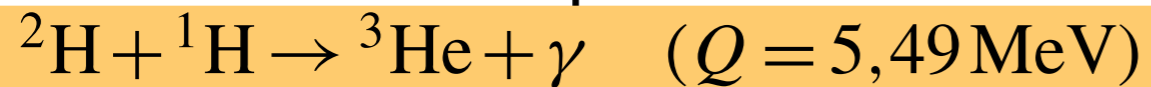
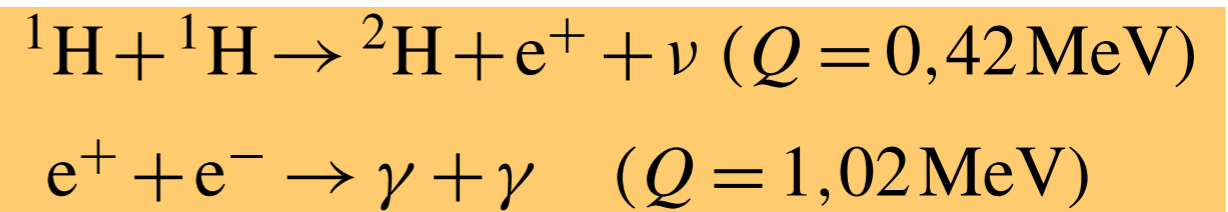
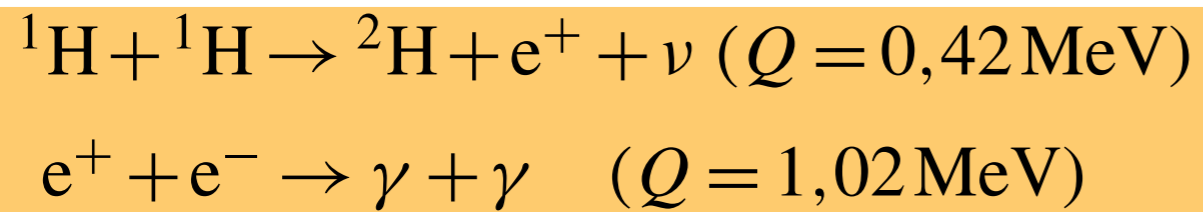
teplota v Slnku: $1,5 \cdot 10^7 \text{K}$ zodpovedá $E = k_B T = 1,3 \text{ keV}$

Coulombovská bariéra pre dva protóny je 400 keV

- túto bariéru prekonajú len najrýchlejšie protóny z termálneho rozdelenia

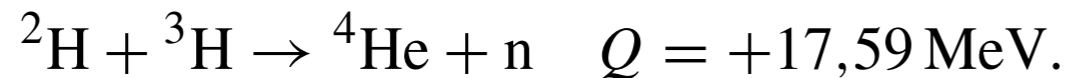
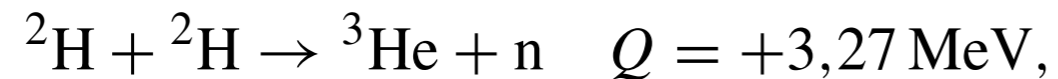


Termojadrová fúzia vo hviezdach



Riadená termojadrová fúzia

využíva iný (rýchlejší) proces, ako hviezdy



Podmienky, ktoré treba splniť:

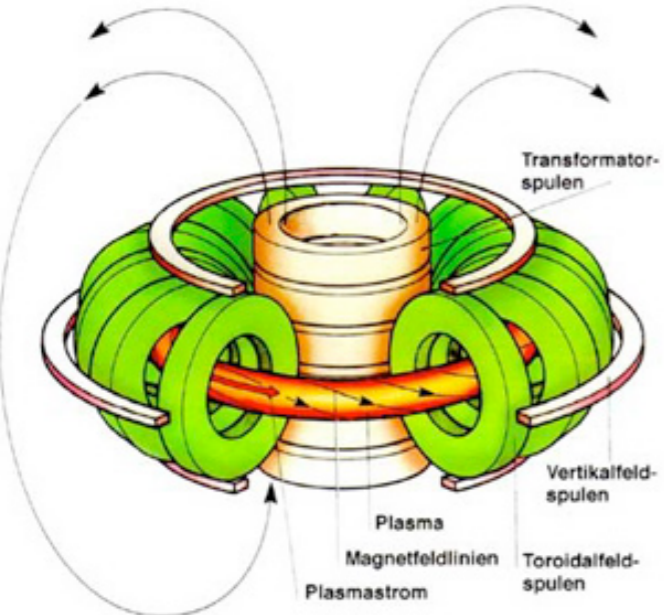
1. vysoká hustota častíc, aby „sa dva deuteróny našli“
2. vysoká teplota plazmy, aby bola prekonaná Coulombovská bariéra
3. dlhá doba udržania, aby fúzovalo dostatočne veľa paliva a uvolnilo sa dostatočne veľa energie

Doteraz neexistuje zariadenie, ktoré produkuje viac energie ako potrebuje na prevádzku.

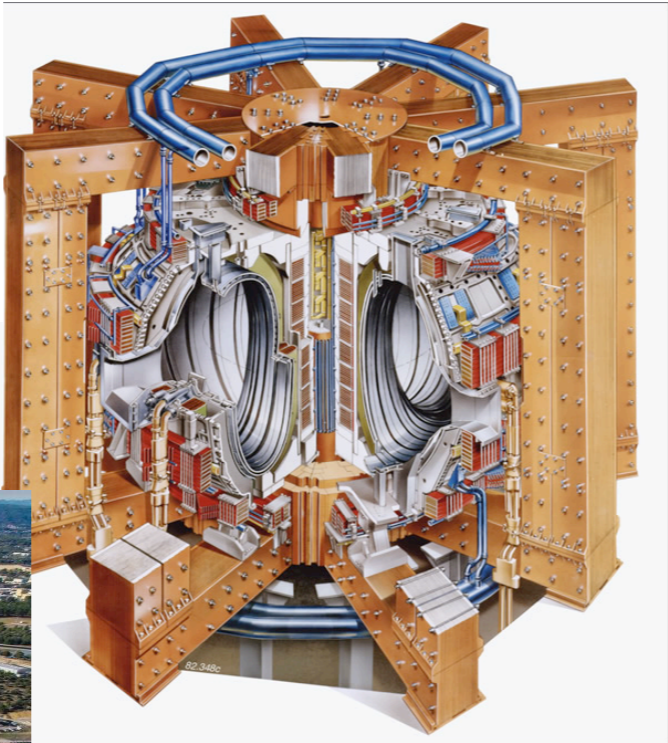
Riadená termojadrová fúzia: technické realizácie

TOKAMAK

uväznenie plazmy pomocou (modifikovaného) toroidálneho mg poľa



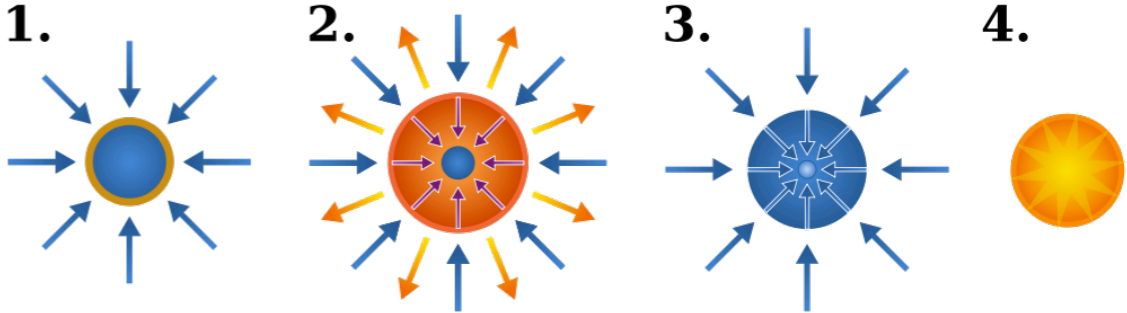
Joint European Torus (JET)



International Thermonuclear Energy Reactor (ITER)

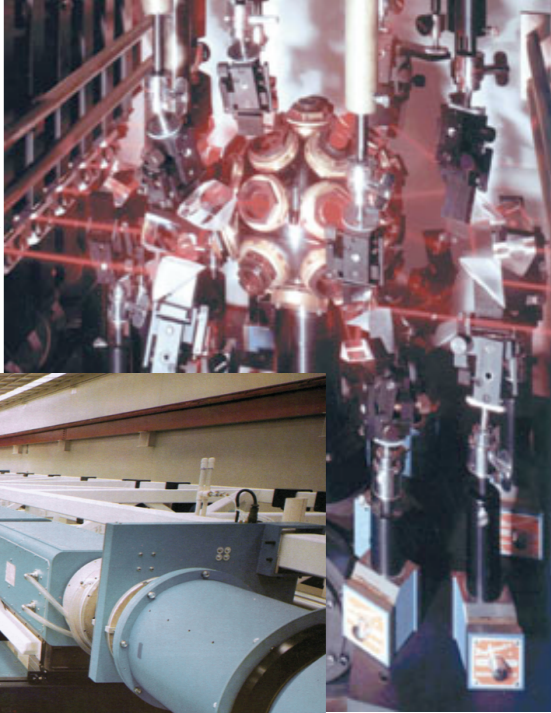
Inerciálne udržiavanie

Zahriatie paliva prudkým stlačením pomocou viacerých laserov

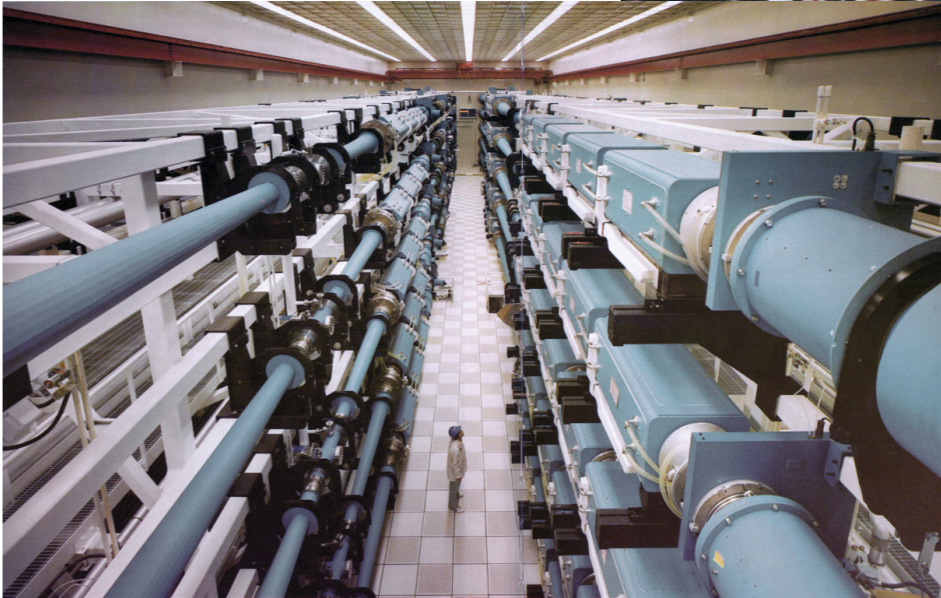


Lawrence Livermore Natl. Lab.

terčiková komora



NOVA laser



Riadená termojadrová fúzia: technické realizácie

TOKAMAK

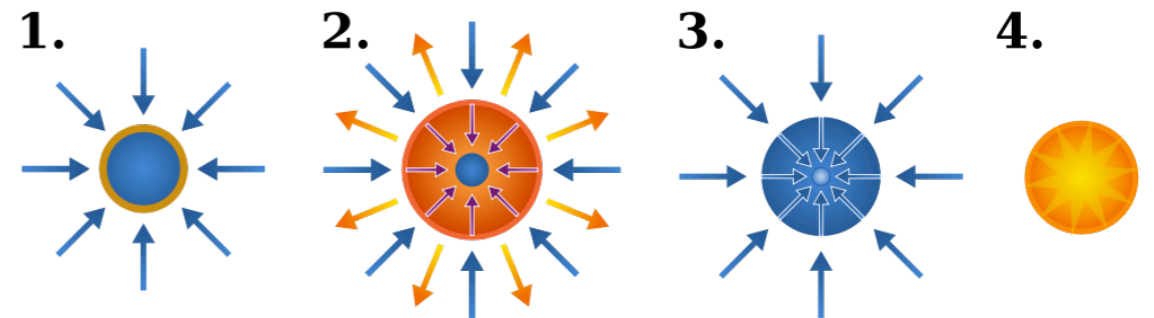
uväznenie plazmy pomocou (modifikovaného) toroidálneho mg poľa



Joint European Torus (JET)

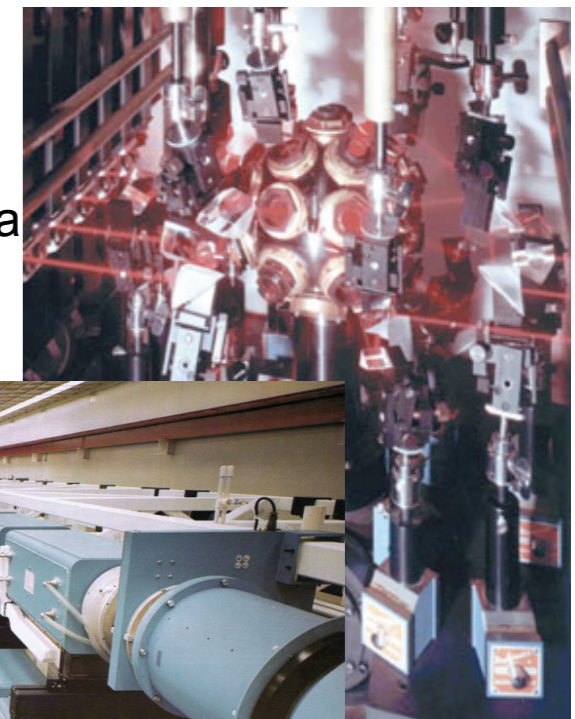
Inerciálne udržiavanie

Zahriatie paliva prudkým stlačením pomocou viacerých laserov

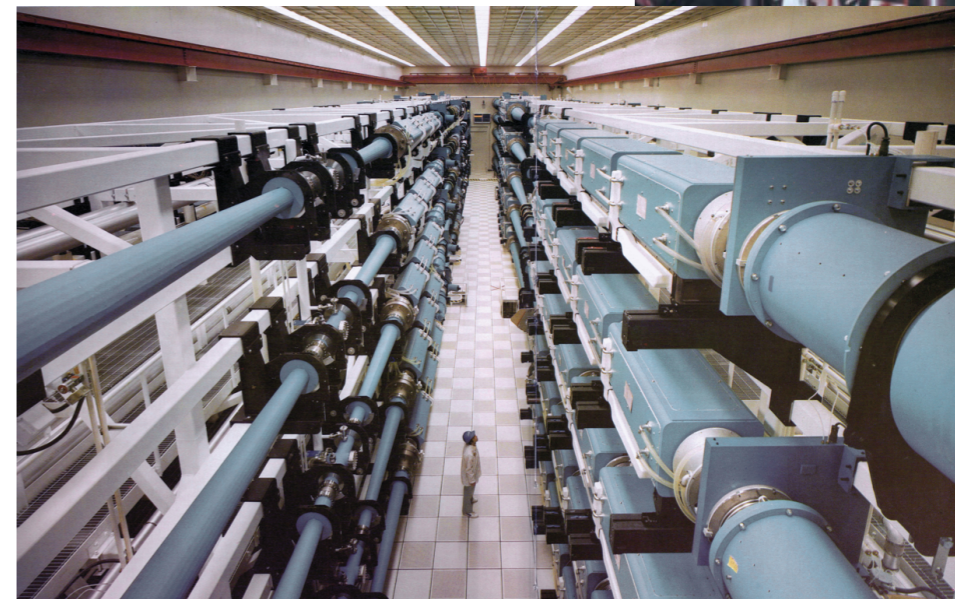


Lawrence Livermore Natl. Lab.

terčíková komora



NOVA laser



Thermonuclear Energy Reactor (ITER)