

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



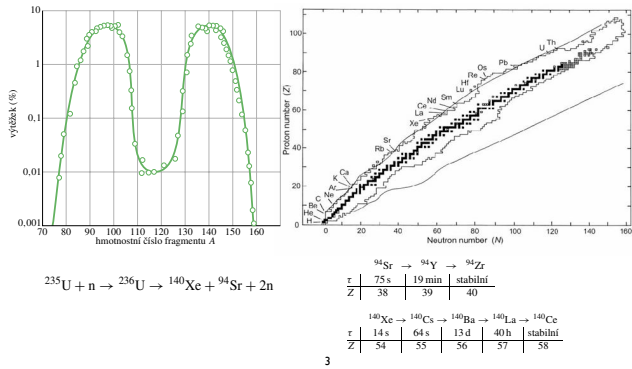
Fritz Straßmann



Otto Robert Frisch

Štiepenie jadra: detailnejší pohľad

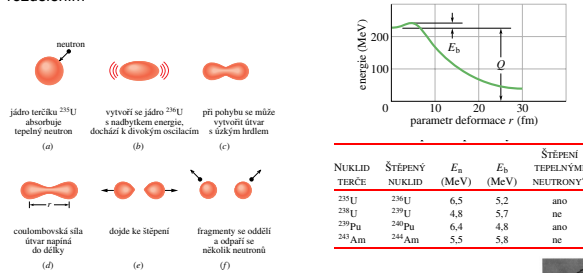
rozpadom prechodového zloženého jadra vznikajú nuklidy bohaté na neutróny, ktoré sa menia β rozpadmi



3

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



4

John Archibald Wheeler



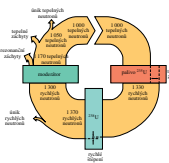
Jadrový reaktor

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

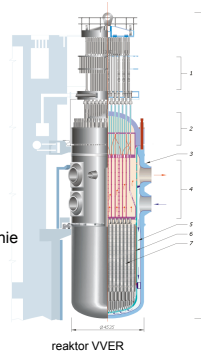
funguje len s ^{235}U , ktorého je obvykle len 0,7%
⇒ zvýšenie koncentrácie na 3%: **obohacovanie uránu**

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)



5

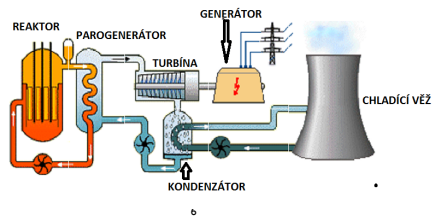
Typy jadrových reaktorov: VVER

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 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$
- obohatený urán na 3,1 - 4,4% ^{235}U (pre VVER 1000 - Temelín)
- najrozšírenejší typ reaktora (včítane AO Mochovce)



6

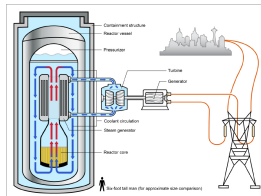
Ďalšie typy reaktorov (vybrané)

- 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)
 - Černobyľ
- (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

7

Malé modulárne reaktory (SMR)

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



8

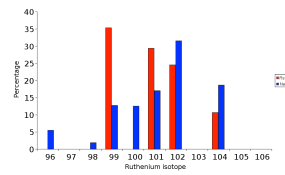
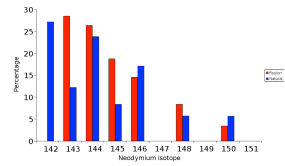
Prírodný jadrový reaktor

Oklo, Gabun, pred zhruba 2 miliónmi rokov



evidencia:

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



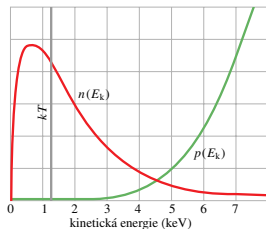
9

Termojadrová fúzia

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

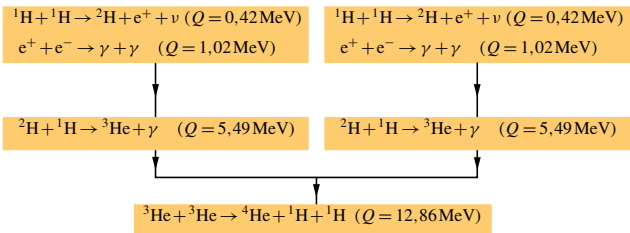
teplota v Slunku: $1,5 \cdot 10^7 \text{K}$ zodpovedá $E = k_B T = 1,3 \text{ keV}$

Coulombovská bariéra pre dva protóny je 400 keV
- túto bariéru prekonávajú len najrýchlejšie protóny z termálneho rozdelenia



10

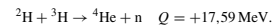
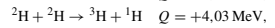
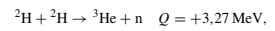
Termojadrová fúzia vo hviezdach



11

Riadená termojadrová fúzia

využíva iný (rýchlejší) proces, ako hviezdy



Podmienky, ktoré treba splniť:

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

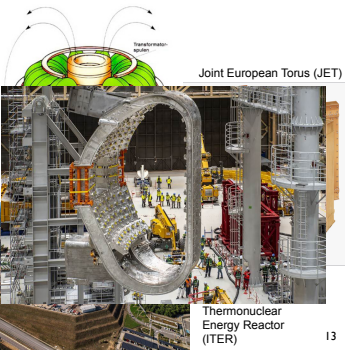
Doteraz neexistuje zariadenie, ktoré produkuje viac energie ako potrebuje na prevádzku.

12

Riadená termojadrová fúzia: technické realizácie

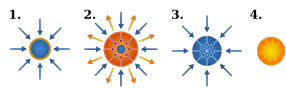
TOKAMAK

uväznenie plazmy pomocou (modifikovaného) toroidálneho magnetického poľa



Inerciálne udržiavanie

Zahriatie paliva prudkým stlačením pomocou viacerých laserov



Lawrence Livermore Natl. Lab.

terčiková komora

NOVA laser

