

# **Kvantová, atómová a subatómová fyzika**

**Využitie energie jadra**

# Štiepenie jadra: história

tepelné neutróny: nie sú odpudzované Coulombovskou silou, ľahké ostreľovanie jadra

ostreľovaním uránu tepelnými ( $E = 0,04 \text{ eV}$ ,  $E=kT$ ) sa objavuje množstvo nových rádioaktívnych nuklidov (Hahn, Meitner, Straßmann), objavilo sa bárium (1938)

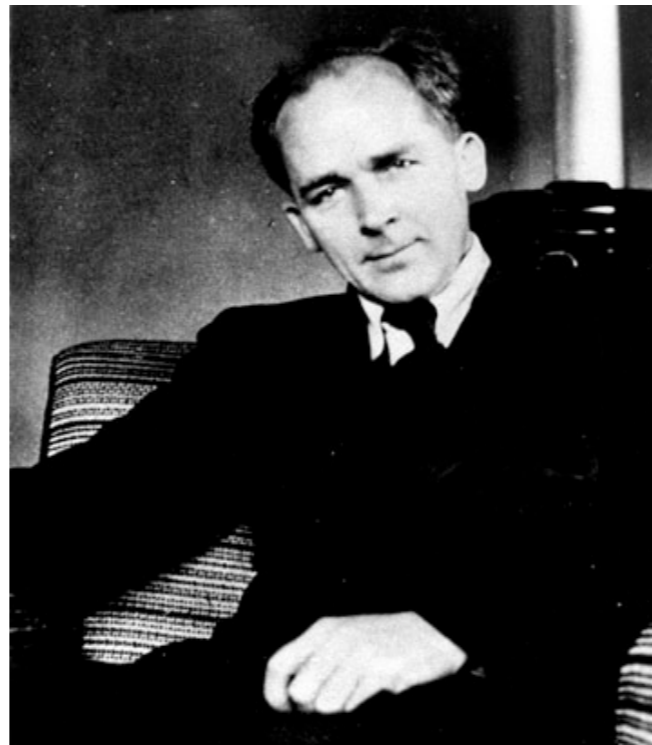
Meitner a Frisch (1939): urán sa po absorpcii jedného neutrónu **štiepi** na ľahšie prvky

Otto Hahn: Nobelova cena 1944

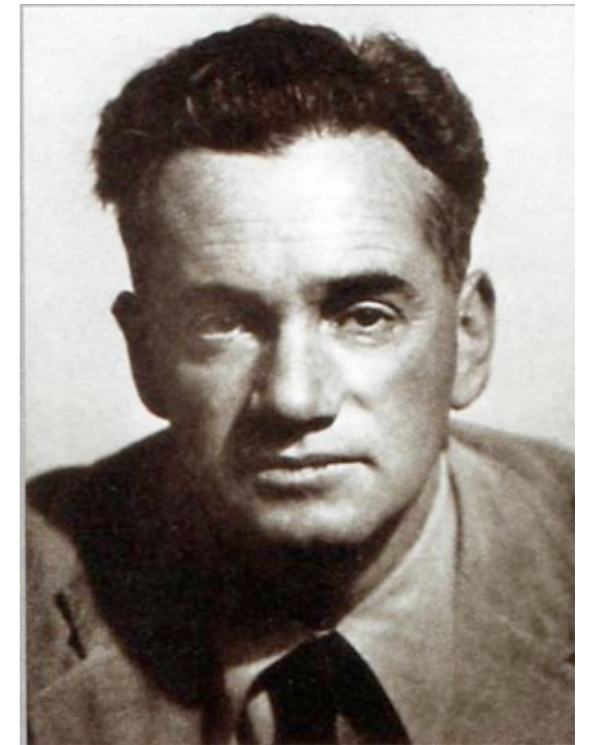


Otto Hahn

Lise Meitner



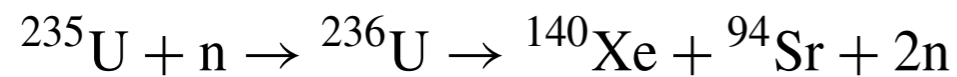
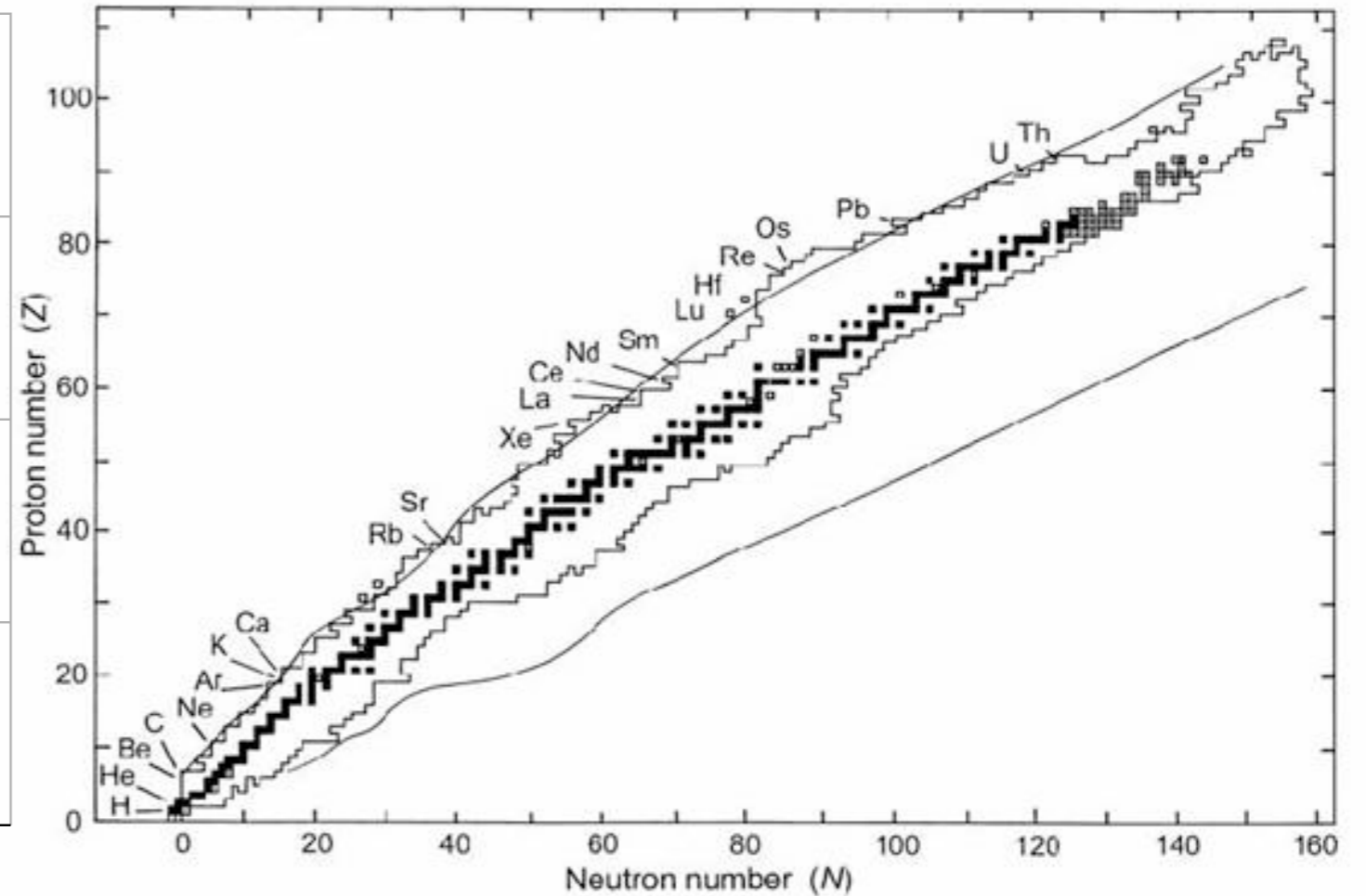
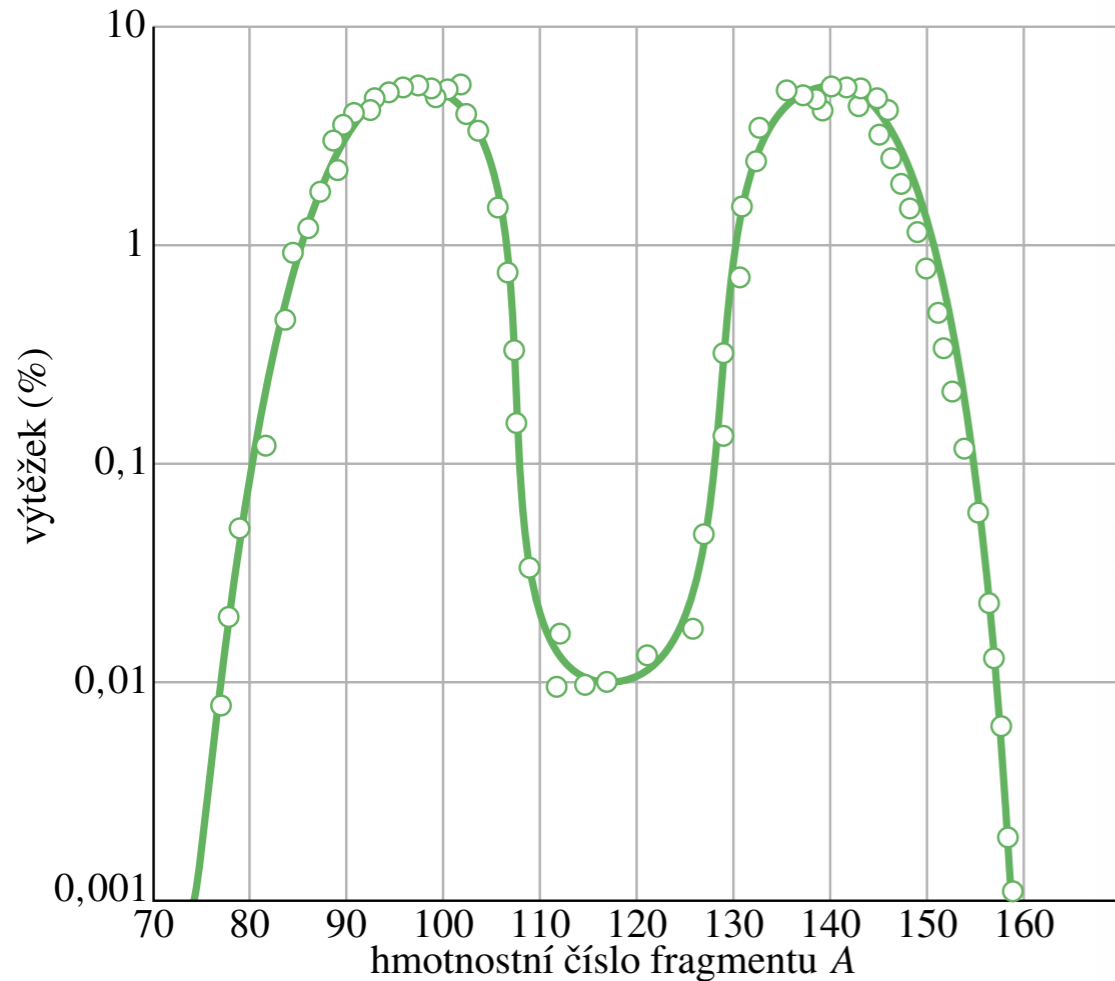
Fritz Straßmann



Otto Robert Frisch

# Štiepenie jadra: detailnejší pohľad

rozpadom prechodového **zloženého jadra** vznikajú nuklidy bohaté na neutróny, ktoré sa menia  $\beta$  rozpadmi

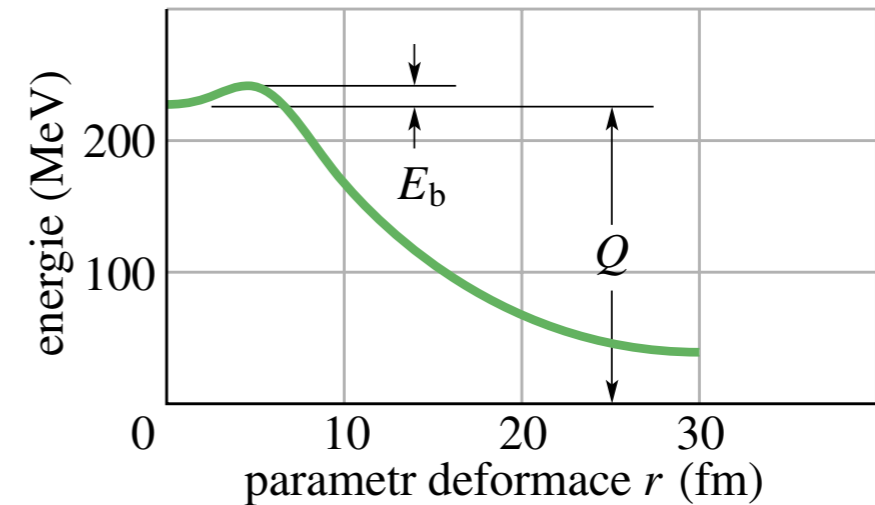
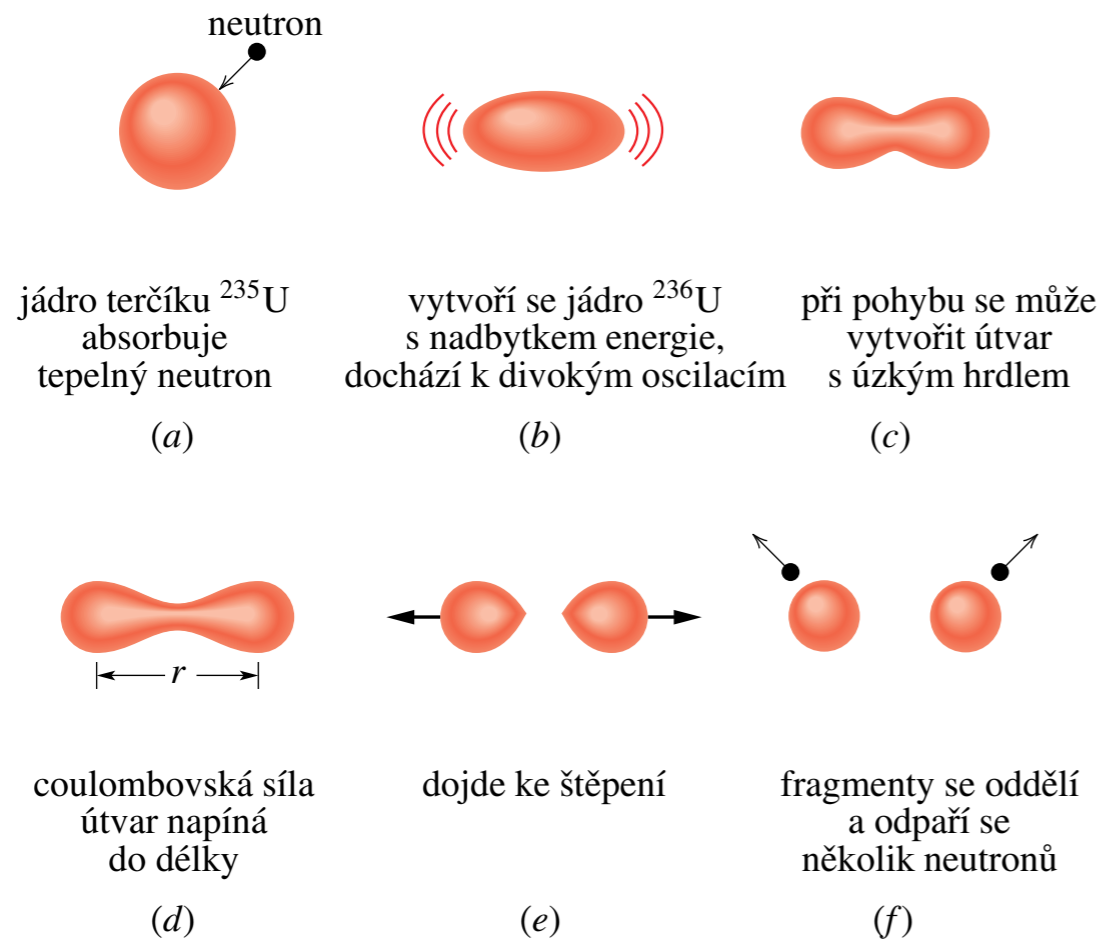


	$^{94}\text{Sr}$	$\rightarrow$	$^{94}\text{Y}$	$\rightarrow$	$^{94}\text{Zr}$
$\tau$	75 s		19 min		stabilní
$Z$	38		39		40

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

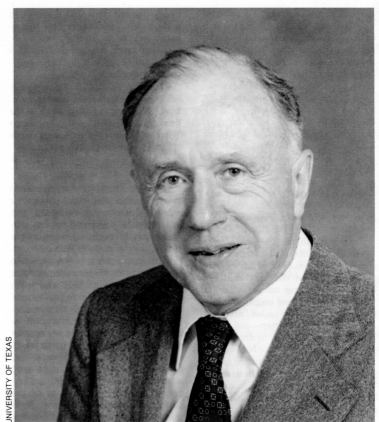
# Štiepenie jadra: Bohrov-Wheelerov (kvapkový) model

- 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?
$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	6,5	5,2	ano
$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{U}$	4,8	5,7	ne
$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	6,4	4,8	ano
$^{243}\text{Am}$	$^{244}\text{Am}$	5,5	5,8	ne

John Archibald Wheeler



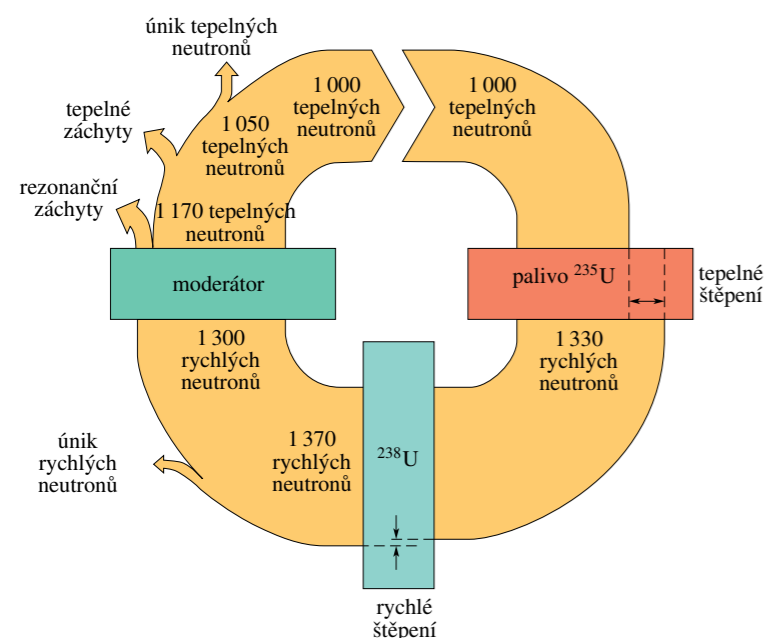
# Jadrový reaktor

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

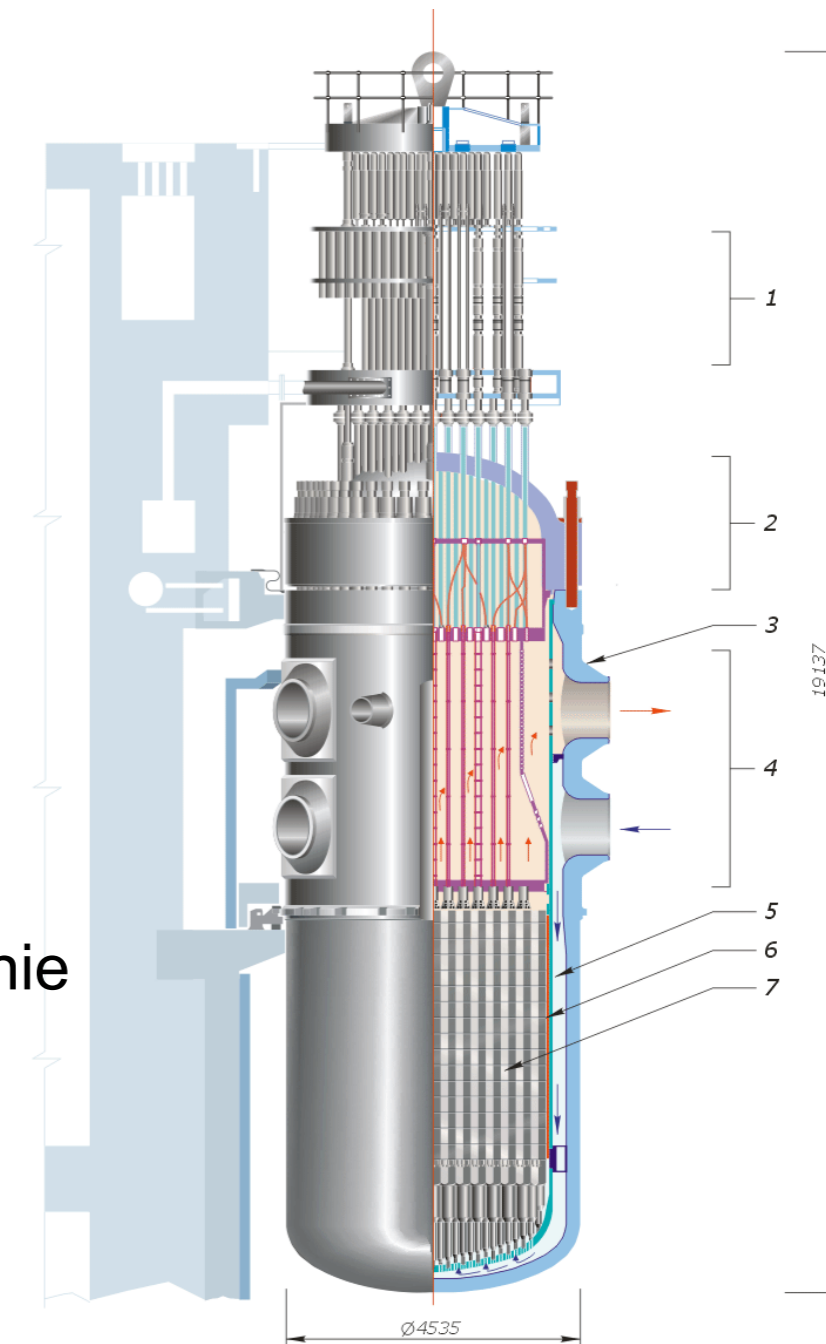
funguje len s  $^{235}\text{U}$ , ktorého je obvykle len 0,7%  
⇒ zvýšenie koncentrácie na 3%: **obohacovanie uránu**

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



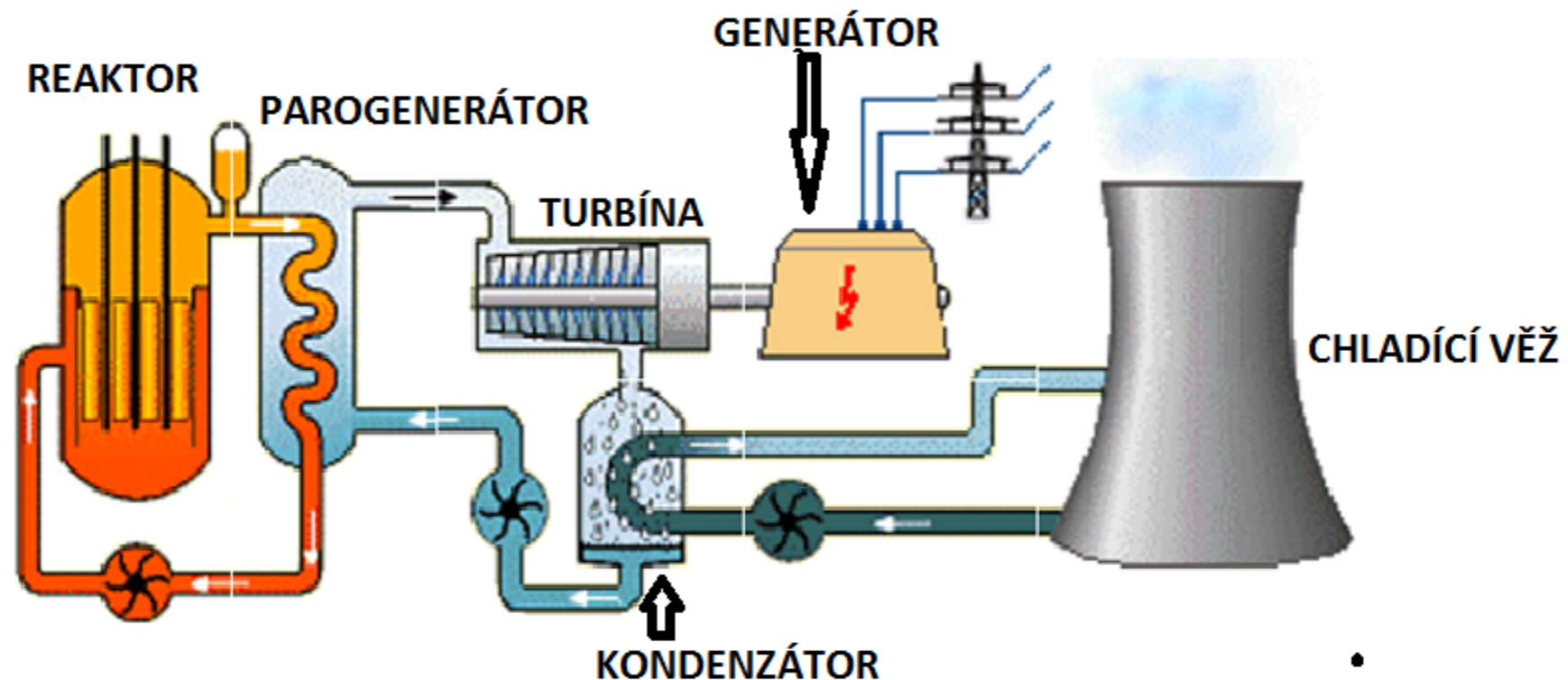
# Typy jadrových reaktorov: VVER

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%  $^{235}\text{U}$  (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)
  - využíva štiepenie rýchlymi neutrónmi (nemá moderátor)
  - palivom je plutónium
  - chladenie tekutý sodíkom
- reaktor založený na roztavenej soli
  - experimentálny koncept,
  - palivo je vo forme tekutej soli, ktorá je v reaktore v kritickom stave aj uhlíkovému moderátoru a geometrii a vo výmenníku v podkritickom stave
  - efektívne využitie neutrónov

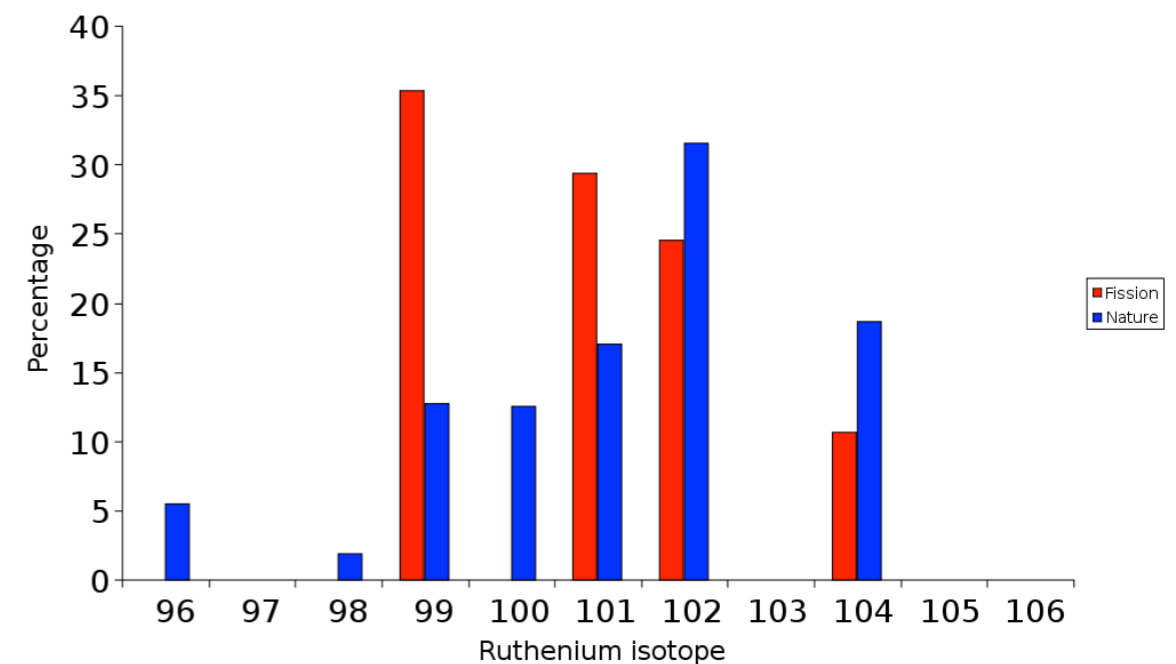
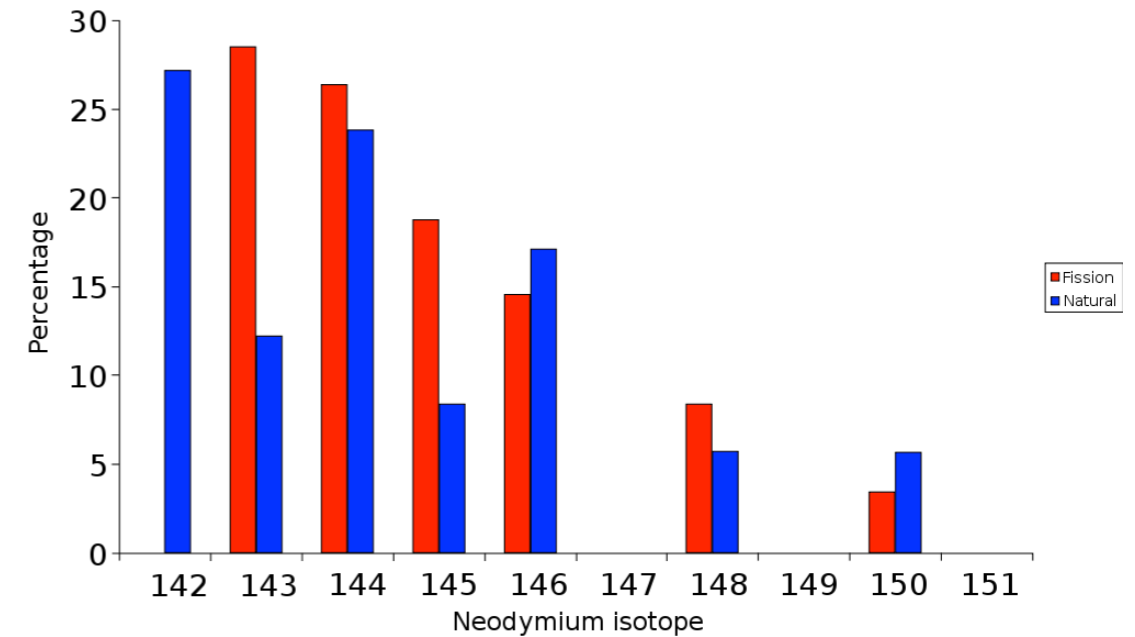
# Prírodný jadrový reaktor

Oklo, Gabun, pred zhruba 2 mld rokov



evidencia:

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





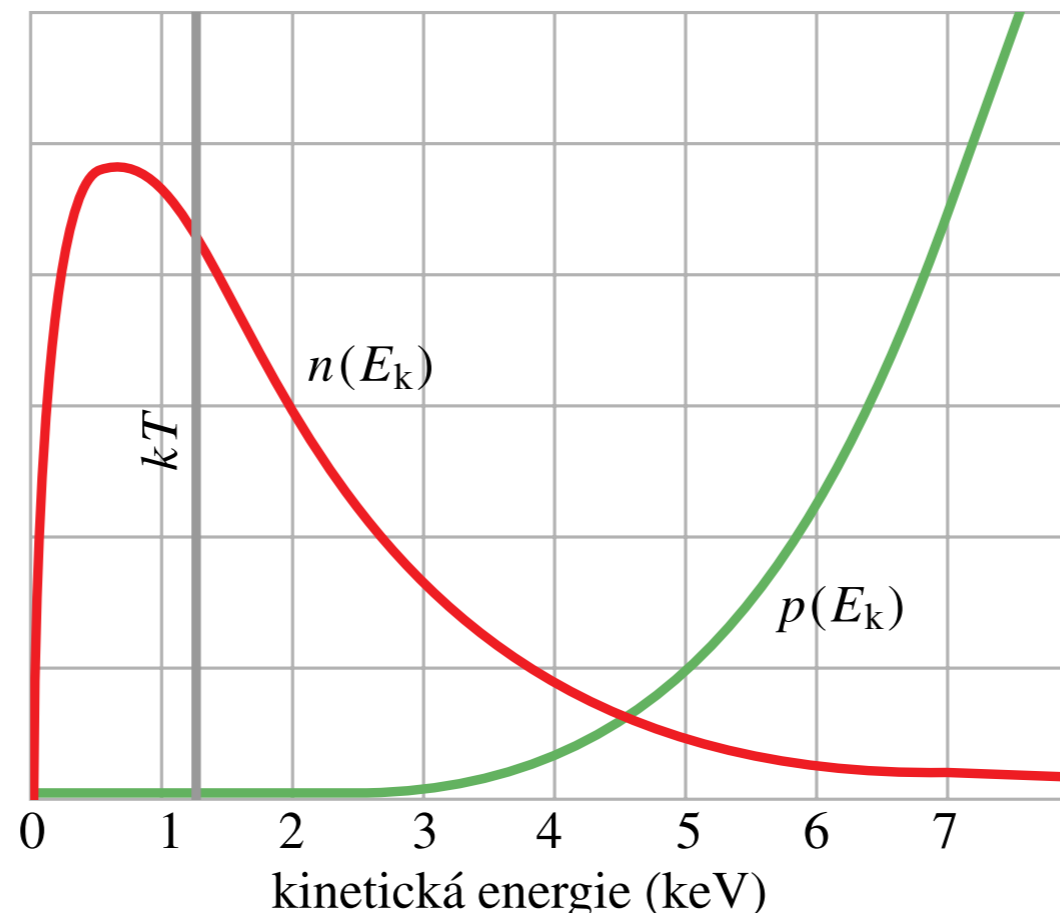
# Termojadrová fúzia

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

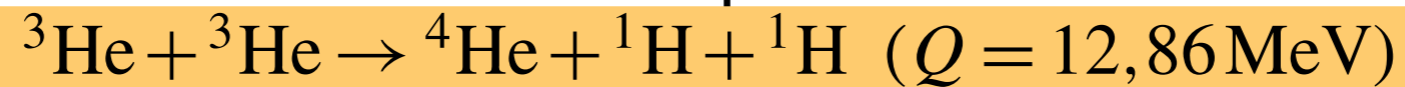
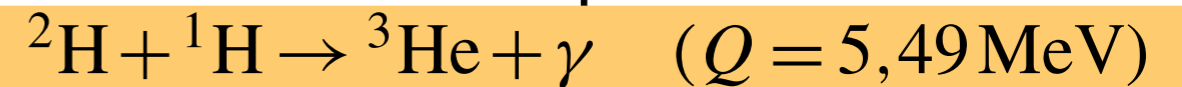
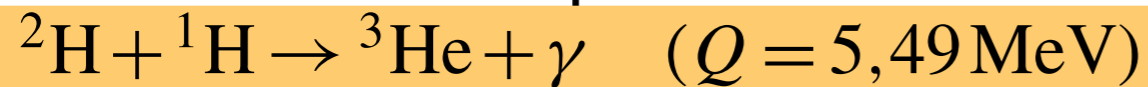
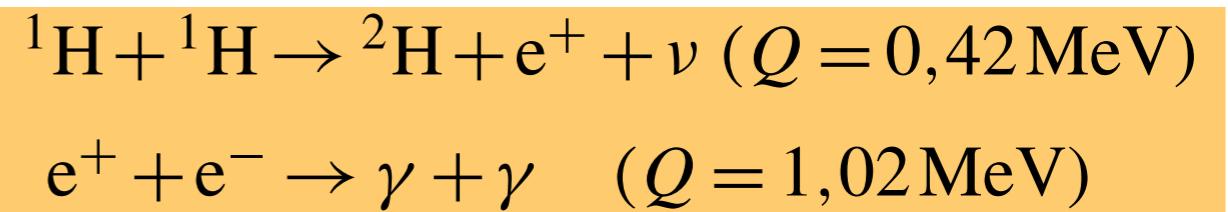
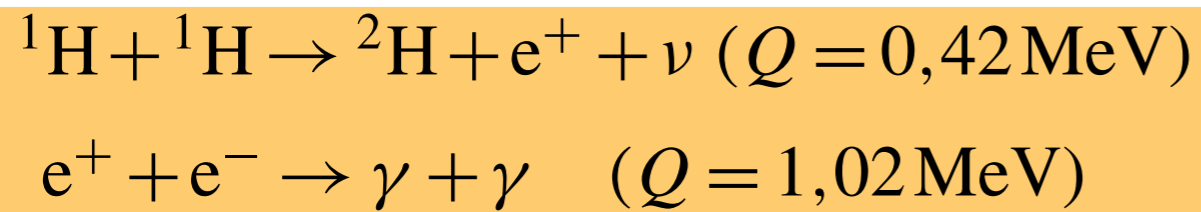
teplota v Slnku:  $1,5 \cdot 10^7 \text{K}$  zodpovedá  $E = k_B T = 1,3 \text{ keV}$

Coulombovská bariéra pre dva protóny je  $400 \text{ keV}$

- túto bariéru prekonajú len najrýchlejšie protóny z termálneho rozdelenia

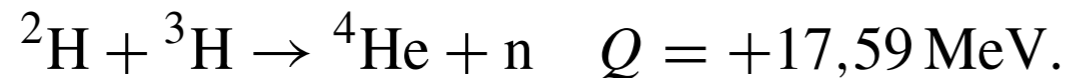
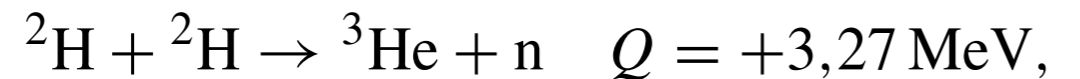


# Termojadrová fúzia vo hviezdach



# Riadená termojadrová fúzia

využíva iný (rýchlejší) proces, ako hviezdy



Podmienky, ktoré treba splniť:

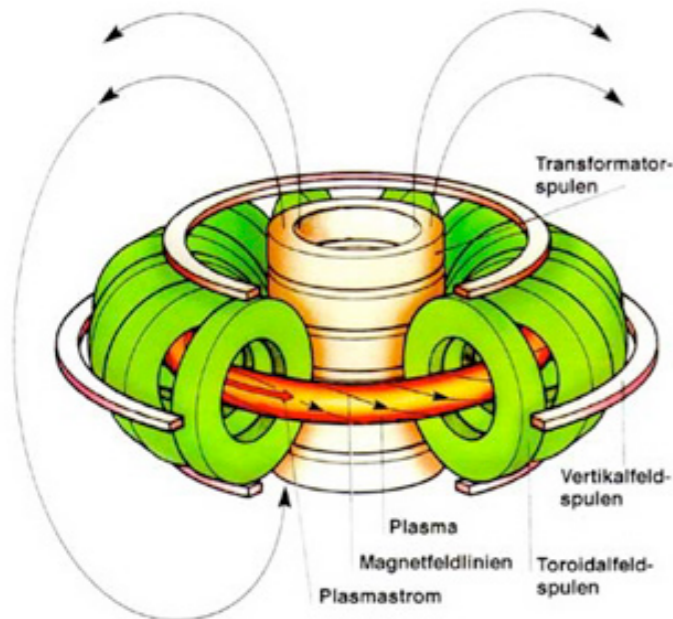
1. vysoká hustota častíc, aby „sa dva deuteróny našli“
2. vysoká teplota plazmy, aby bola prekonaná Coulombovská bariéra
3. dlhá doba udržania, aby fúzovalo dostatočne veľa paliva a uvolnilo sa dostatočne veľa energie

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

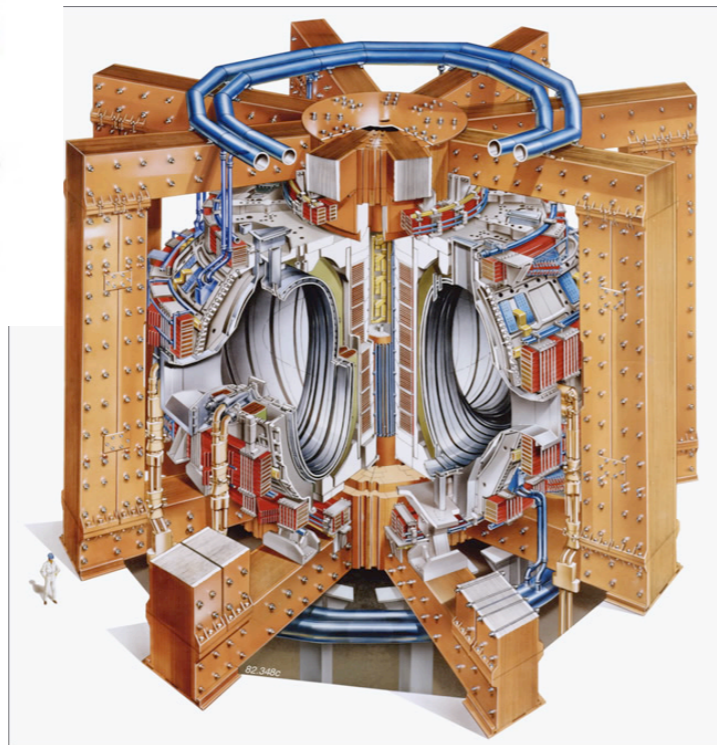
# Riadená termojadrová fúzia: technické realizácie

## TOKAMAK

uväznenie plazmy pomocou (modifikovaného) toroidálneho mg poľa



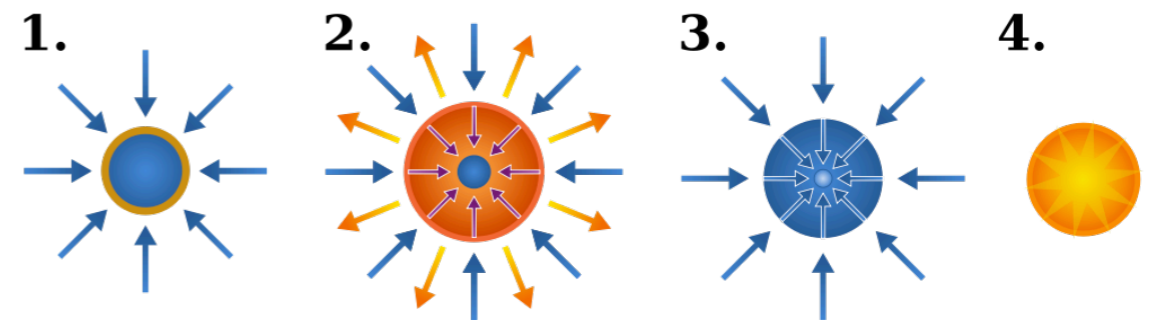
Joint European Torus (JET)



International Thermonuclear Energy Reactor (ITER)

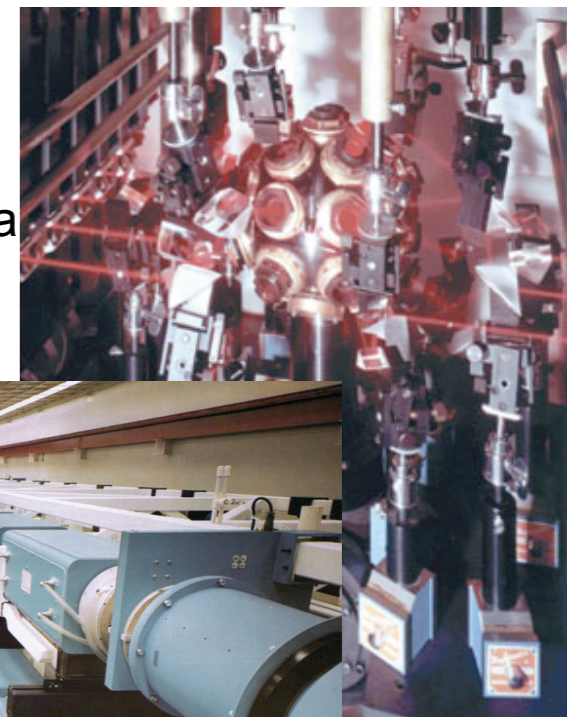
## Inerciálne udržiavanie

Zahriatie paliva prudkým stlačením pomocou viacerých laserov



Lawrence Livermore Natl. Lab.

terčiková komora



NOVA laser

