

# ZDROJE NEUTRÓNŮV

## Vlastnosti neutrónového žiarenia

Dozimetria a radiačná ochrana

Ing. Róbert Hinca

### Neutrón

- Neutrón môže byť viazaný v jadre ako **nukleón**. Vtedy je stabilný.
- Neutrón môže existovať ako **vol'ná častica**. Vtedy je nestabilný a podlieha beta premene s polčasom 10,3 min (stredná doba života  $10,3/0,693=14,9$  min).
- V prírode v podstate neexistujú nuklidy, ktoré by podliehali spontánnej premene spojennej s emisiou neutrónov s výnimkou spontánneho štiepenia uránu.
- Podiel štiepení na premene  $^{235}\text{U}$  je  $7 \cdot 10^{-9}$  a  $^{238}\text{U}$  je  $5,45 \cdot 10^{-5}$  (ostatné je alfa premena).

## Rozdelenie neutrónov

- Tepelné (pomalé) neutróny (0-0,1 keV)
  - ultrastudené ( $E < 10^{-7}$  eV), majú **vlnové vlastnosti**
  - studené ( $E < 5 \cdot 10^{-3}$  eV), majú vlnové vlastnosti
  - tepelné ( $E < 0,1$  eV), charakteristická **difúzia** v látke
- Nadteplné (rezonančné) neutróny (0,1-500 eV), charakteristické je **spomaľovanie** ( $\sigma_s \sim 1/v$ ) a rezonančný záchyt ( $n, \gamma$ )
- Rýchle neutróny (0,2 - 2 MeV), pružný a nepružný rozptyl, prahové jadrové reakcie
- Veľmi rýchle neutróny ( $E > 20$  MeV), spalačné reakcie, roztrieštenie jadier

3

## Rozdelenie neutrónov podľa rýchlosti (energie)

$$E_p = kT$$

$$\bar{E} = \frac{4kT}{\pi}$$

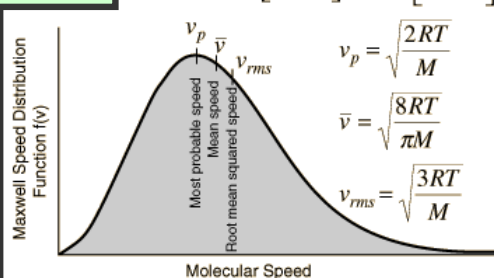
$$E_{rms} = \frac{3}{2}kT$$

**Bolzmanna konštanta**  
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$   
 $J = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$

$$R = k \cdot N_A$$


*M - molárna hmotnosť*

$$f(v) = 4\pi \left[ \frac{M}{2\pi RT} \right]^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left[ \frac{-Mv^2}{2RT} \right]$$




$T[\text{K}]$	$E_p[\text{eV}]$	$E_{rms}[\text{eV}]$	$v_p[\text{ms}^{-1}]$	$v_{rms}[\text{ms}^{-1}]$
300	<b>0.025</b>	<b>0.039</b>	<b>2222</b>	<b>2740</b>
600	<b>0.052</b>	<b>0.077</b>	<b>3144</b>	<b>3870</b>

4




Zdroje neutrónov		
PROCES	PRIKLAD	VÝŤAŽOK NEUTRÓNOV
$(\alpha, n), (\gamma, n)$	$^{226}\text{Ra}$ - Be zdroj $(\alpha, n)$ $^{124}\text{Sb}$ - Be zdroj $(\gamma, n)$	502 n na $10^6 \alpha$ 5,1 n na $10^6 \gamma$
Urýchľovače častíc (p, n), (d, n), $(\alpha, n)$	$^7\text{Li}(p, n), ^{12}\text{C}(d, n),$ $^9\text{Be}(\alpha, n), ^2\text{H}(d, n),$ $^3\text{H}(p, n), ^3\text{H}(d, n)$	$2 \cdot 10^{11} \text{ n}/(\mu\text{C} \cdot \text{sr})$
Delenie (n, f)	$^{235}\text{U}$ v reaktore	1 / delenie
Jadrová syntéza	400 keV deuteróny a tríciový terčik	$4 \cdot 10^{-5} / \text{d}$
$(\gamma, n)$ a foto-delenie $(\gamma, f)$ Reakcie s brzdným elektrónovým žiarením	100 MeV elektróny a uránový terčik,	$5 \cdot 10^{-2} / \text{e}$
Spalačná reakcia	800 - 1600 MeV protóny a terčik z ťažkého kovu	30 n / p

5




Reakcie v rádionuklidových zdrojoch neutrónov
$^9\text{Be} + \alpha \rightarrow ^{12}\text{C} + ^1\text{n}$ $^{13}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + ^1\text{n}$ $^7\text{Li} + \alpha \rightarrow ^{10}\text{B} + ^1\text{n}$ $^{19}\text{F} + \alpha \rightarrow ^{22}\text{Na} + ^1\text{n}$ $\gamma + ^9\text{Be} \rightarrow ^8\text{Be} + ^1\text{n}$ $\gamma + ^2\text{H} \rightarrow ^1\text{H} + ^1\text{n}$

6



Charakteristiky niektorých zdrojov ( $\gamma, n$ )			
Zdroj	Polčas rozpadu	Terčové jadro	Výt'azok neutrónov na $10^{10}$ Bq $\gamma$ , n/s
$^{24}\text{Na}$	15 hod	Be	340 000
		D	330 000
$^{28}\text{Al}$	67 dní	Be	32 600
$^{38}\text{Cl}$	3 roky	Be	43 100
$^{88}\text{Y}$	107 dní	Be	229 000
		D	160
$^{124}\text{Sb}$	60.2 dní	Be	210 000

7



Charakteristiky Be( $\alpha, n$ ) zdrojov		
Zdroj	Polčas rozpadu	Výt'azok neutrónov na $10^6$ častíc $\alpha$
$^{239}\text{Pu}/\text{Be}$	24 000 rokov	57
$^{210}\text{Po}/\text{Be}$	138 dní	69
$^{238}\text{Pu}/\text{Be}$	87,4 rokov	79*
$^{241}\text{Am}/\text{Be}$	433 rokov	70
$^{244}\text{Cm}/\text{Be}$	18 rokov	100*
$^{226}\text{Ra}/\text{Be}$	1 602 rokov	502*
$^{227}\text{Ac}/\text{Be}$	21,6 rokov	702

\* veličina určená výpočtom

8



**$^{252}\text{Cf}$** 

- Izotop  $^{252}\text{Cf}$  emituje neutróny spontánne po štiepení.
- Tento prvok sa v prírode nevyskytuje.
- V jadrovom reaktore vzniká izotop  $^{252}\text{Cf}$  z izotopu  $^{238}\text{U}$  ( $^{242}\text{Pu}$ ) sériou zachytných reakcií neutrónov a následných beta rozpadov.
- $^{252}\text{Cf}$  sa rozpadá  $\alpha$  rozpadom na  $^{248}\text{Cm}$  ( $E_{\alpha}=6,2\text{ MeV}$  96,91%) alebo sa spontánne štiepi (3,09%) s  $T_{1/2}=2,647$  roka.
- Pri štiepení emituje v priemere 3,7675 neutrónov, teda na 100 rozpadov emituje  $3,09 \times 3,7675 = 11,627$  neutrónov.
- 1 mg čistého  $^{252}\text{Cf}$  emituje cca.  $2,36 \cdot 10^9$  n/s.

9

**Energetické spektrum rádionuklidového zdroja**

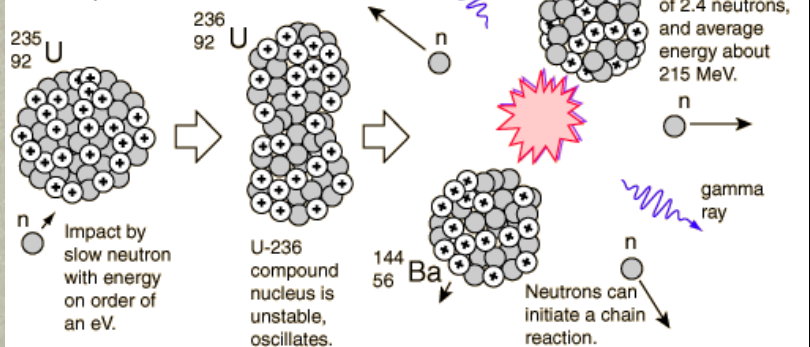
Energetické spektrum neutrónov Po+Be zdroja



10

## Produkcia neutrónov pri štiepnej reakcii

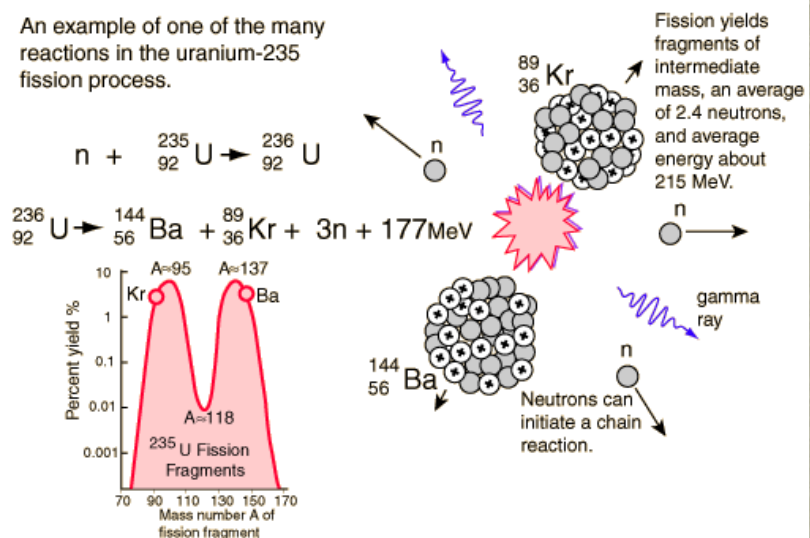
An example of one of the many reactions in the uranium-235 fission process.



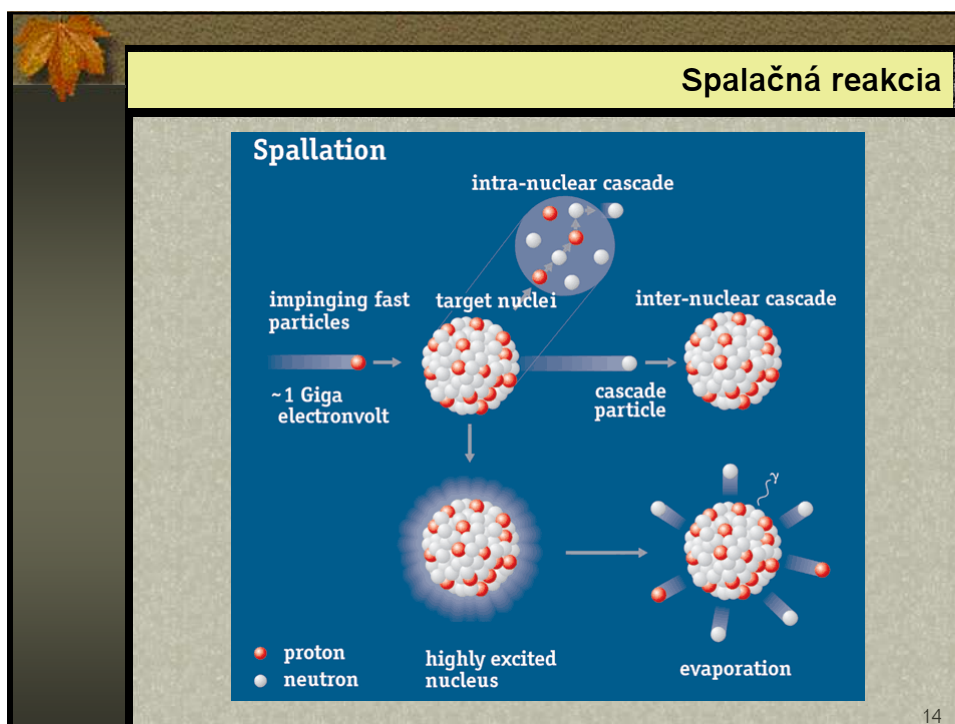
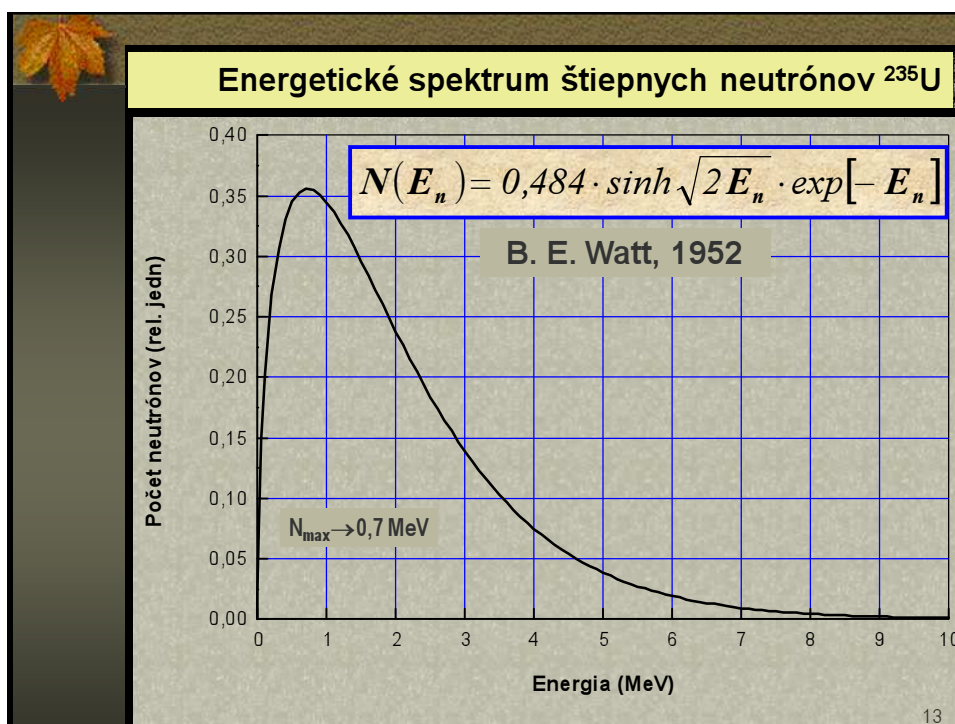
11

## Príklad štiepnej reakcie

An example of one of the many reactions in the uranium-235 fission process.

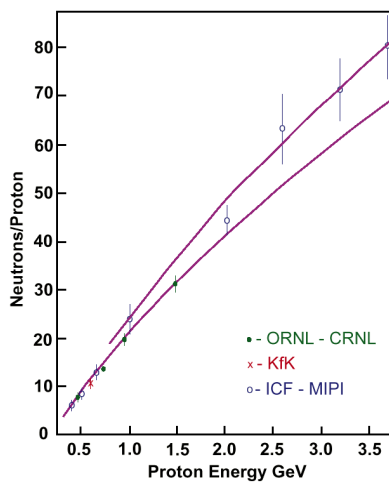


12



## Charakteristiky spalačných zdrojov

### Neutron Production versus Proton Energy



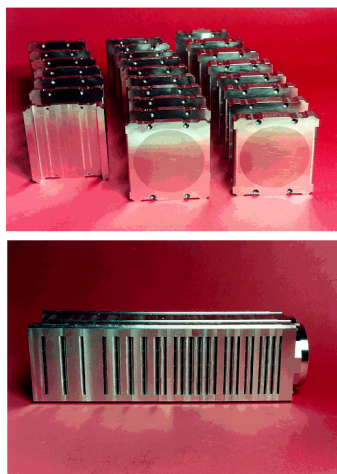
### Physical and Mechanical Properties of Target Materials

	W	Ta	Pt	Pb	U
Atomic number	74	73	78	82	92
Atomic weight	183.84	180.95	195.08	207.2	238.02
Cross section for thermal neutrons, b	18.5	22	9	0.18	7.7
Density g/cm <sup>3</sup>	19.3	16.6	21.5	11.3	19.05
Melting point	3410	3000	1772	327	1135
UTS MPa	1000	300	150	12	386
Thermal expansion coefficient 10 <sup>-6</sup> /K	4.5	6.3	8.8	28.9	36.1
Neutrons/proton at 800 MeV	13.9	13.7	14.6	15.4	34.0
Resonance absorption cross section b	352	600	355	0.16	290

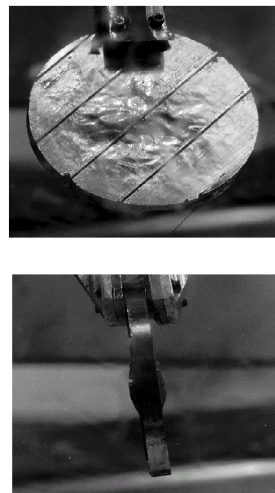
15

## Konštrukcia terčika a jeho radiačné poškodenie

### The ISIS Target Construction




### Uranium



16






### Základné procesy pri interakcii neutrónov s látkou

- **Pružný rozptyl** - neutrón odovzdáva časť svojej energie odrazenému jadru, pričom sa mení smer jeho dráhy.
- **Nepružný rozptyl** ( $n, n'$ ) - neutrón s dostatočnou energiou je pohltý jadrom, ktoré sa dostáva do excitovaného stavu. Pri prechode do základného stavu môže excitované jadro emitovať jeden alebo viac fotónov ( $n, n', \gamma$ ).
- **Radiačný záchyt** - ( $n, \gamma$ ) veľmi pravdepodobný proces tepelných neutrónov a rezonančných neutrónov.
- **Uvolňovanie nabitých častíc** - ( $n, \alpha$ ), ( $n, d$ ), ( $n, f$ ), ( $n, p$ ). Proces je najpravdepodobnejší pre ľahké jadrá a rýchle neutróny (typickým príkladom sú reakcie vzniku  $\alpha$  z jadier Li, B).
- **Štiepenie** - ( $n, f$ )
- **Roztriešenie jadier** - spalačná reakcia

17



### Interakcia neutrónov s látkou

- Mierou pravdepodobnosti interakcie neutrónov s látkou je **účinný prierez**  $\sigma$  [ $\text{m}^2$ ].
- Staršou jednotkou je barn ( $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$ ).
- Vo všeobecnosti je definovaný pre danú terčovú entitu a pre danú interakciu alebo proces vyvolaný dopadajúcimi nabitými alebo nenabitými časticami daného typu a energie ako **podiel pravdepodobnosti tejto reakcie alebo deja pre danú terčovú entitu a fluencie dopadajúcich častíc**.

$$\sigma = \frac{P}{\Phi}$$

18

## Mikro- a makroskopický účinný prierez

- $\sigma_a$  - účinný prierez pre záchyt
- $\sigma_s$  - účinný prierez pre rozptyl
- $\sigma_f$  - účinný prierez pre štiepenie
- $\sigma_{tot}$  - celkový účinný prierez

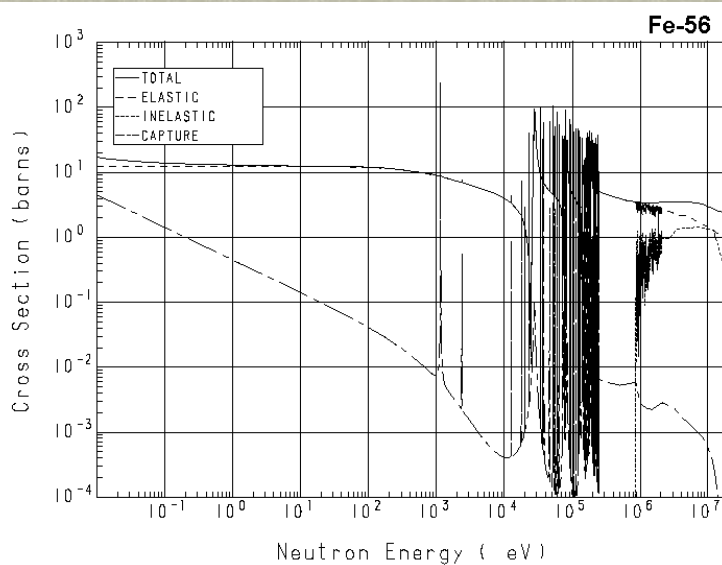
$$\sigma_{tot} = \sum_i \sigma_i$$

- $\Sigma$  - makroskopický (objemový) účinný prierez [ $m^{-1}$ ]
- $\Sigma = n\sigma$ , kde  $n$  je hustota jadier [ $m^{-3}$ ]

$$\Sigma = \sum_i n_i \sigma_i$$

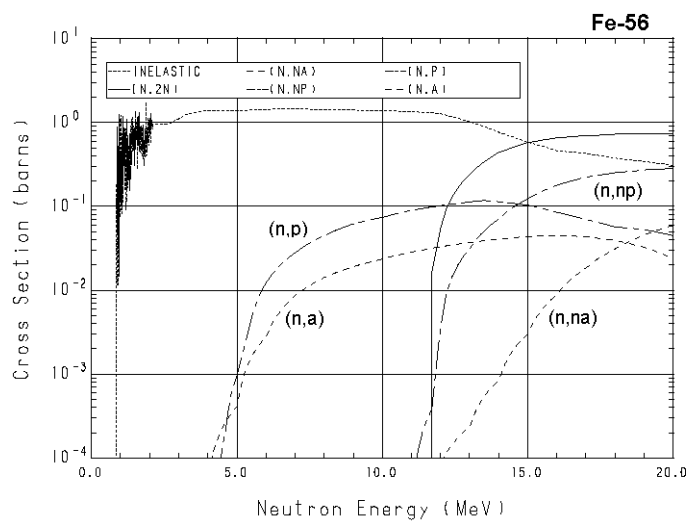
19

## Účinný prierez interakcie neutrónov



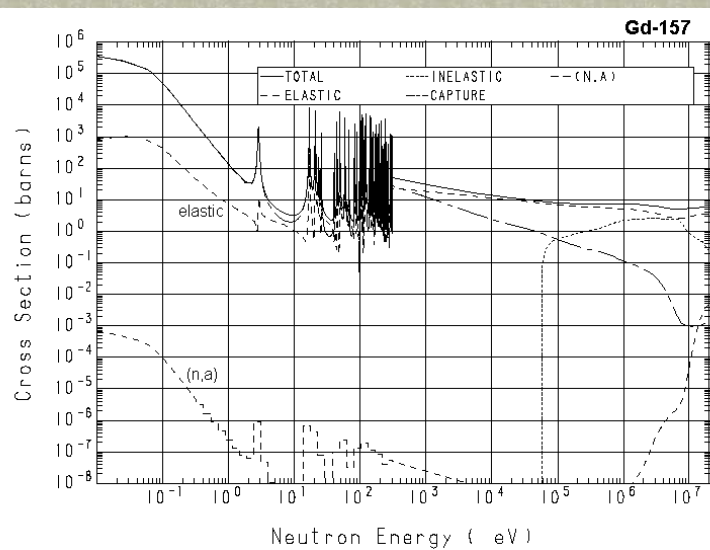
20

## Účinný prierez interakcie neutrónov



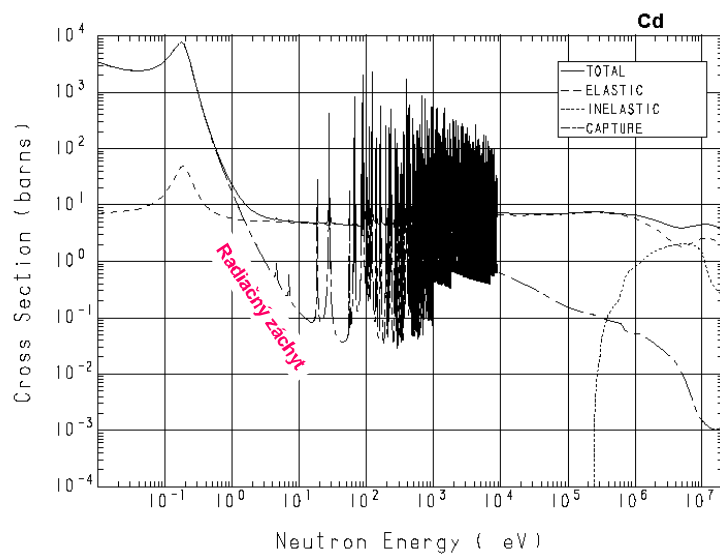
21

## Účinný prierez interakcie neutrónov



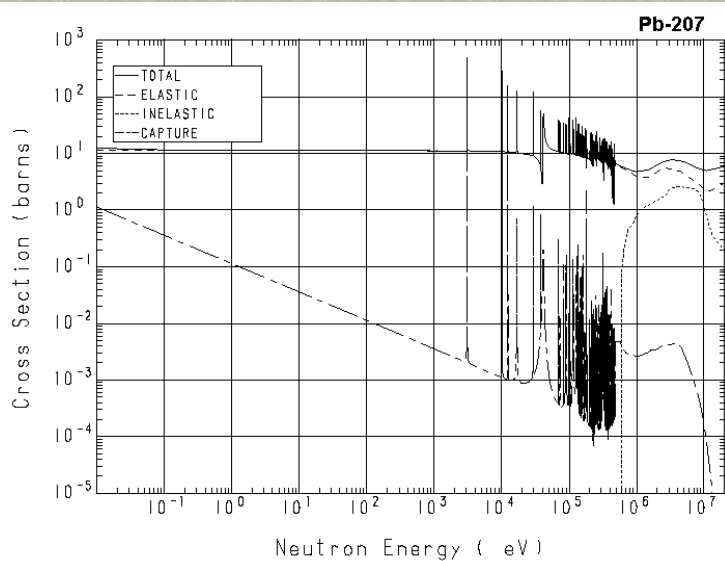
22

## Účinný prierez interakcie neutrónov



23

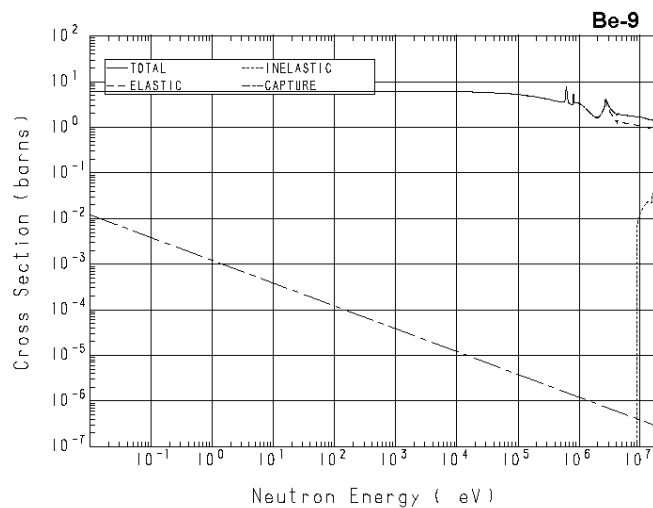
## Účinný prierez interakcie neutrónov



24

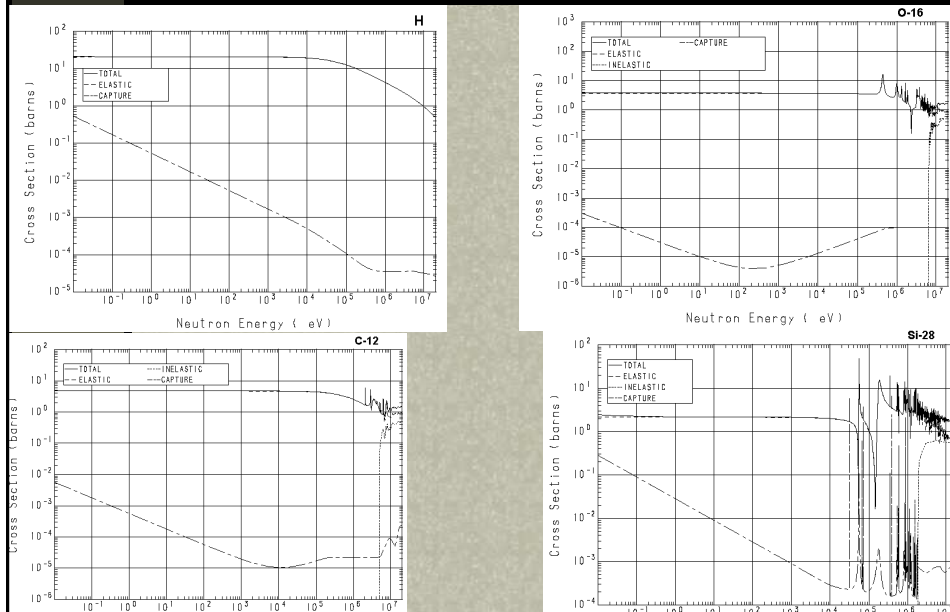


## Účinný prierez interakcie neutrónov



25

## Účinný prierez interakcie neutrónov



### Zoslabovanie toku neutrónov v látke

- Zoslabovanie úzkeho kolimovaného zväzku neutrónov prebieha podľa exponenciálneho zákona

$$\varphi_x = \varphi_0 \cdot e^{-n\sigma_t x} = \varphi_0 \cdot e^{-\Sigma_t x}$$

$$\Sigma = n\sigma = \frac{\rho N_A}{A} \sigma$$

27

### Relaxačná dĺžka $\lambda$


- Recipročná hodnota veličiny  $\Sigma$ , sa nazýva **relaxačná dĺžka** daného materiálu, čo je vzdialenosť, na ktorej pôvodná hustota toku neutrónov poklesne e - krát.

$$\varphi_x = \varphi_0 \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

- Hustotu toku neutrónov vo vzdialenosti  $R$  od izotropného bodového zdroja neutrónov, z ktorého vyletuje  $N_0$  neutrónov za jednotku času, určíme zo vzťahu


$$\varphi_R = \frac{N_0}{4\pi R^2} e^{-\frac{R}{\lambda}}$$


28



Relaxačná dĺžka pre neutróny s $E \sim 1$ MeV		
Materiál	$\rho$ (g·cm <sup>-3</sup> )	$\lambda$ (cm)
Grafit	1,67	13,2
Hliník	2,7	14,8
Betón	2,2	11
Voda	1	9
Železo	7,6	12,6
Karbid bóru	1,3	14,6
Polyetylén	0,92	6,5
Titán	4,5	10
Olovo	11,34	18

29


- 
- ### Princípy návrhu ochrany pred neutrónmi
- Absorpcia neutrónov je najvyššia v oblasti tepelných, pomalých a rezonančných energií. Rýchle neutróny treba najprv **spomaliť**.
  - Stredná strata energie neutrónov pri pružnom rozptyle je maximálna pre **ľahké jadrá** a rastie s poklesom protónového čísla Z absorbátora. Rýchle neutróny sú účinne spomaľované takými látkami, ako sú voda, parafín, PE, plasty, betón a pod.
  - Na **absorpciu** tepelných neutrónov treba vybrať materiál s veľkým účinným prierezom absorpcie, napr. zlúčeniny bóru, zlúčeniny kadmia, betón a pod.
  - Po zachytení tepelných neutrónov vždy vzniká sekundárne  $\gamma$  žiarenie, ktoré pri navrhovaní ochrany treba brať do úvahy. Najlepšie pohlcuje **gama** žiarenie ťažký materiál.
- 30



Spomaľovanie neutrónov				
Materiál	A	$\xi$	$\xi \Sigma_s / \Sigma_a$	n ( $E_0=2\text{MeV}$ , $E_n=0,025\text{ eV}$ )
Vodík	1	1,0	66	18
Voda		0,927	67	19
Deutérium	2	0,726	5820	25
Berýlium	9	0,208	160	85
Uhlík	12	0,158	169	115
Kyslík	16	0,120	487	150
Urán	238	0,00838		2172

$\xi$  Priemerný logaritmický dekrement energie  
 $\xi \Sigma_s$  Spomaľovacia schopnosť  
 $\xi \Sigma_s / \Sigma_a$  Moderačný pomer  
 $n$  Počet zrážok potrebných na spomalenie neutrónu

31




**Priemerný logaritmický dekrement energie  $\xi$**

- je priemerná hodnota nárastu **letargie** pri pružných zrážkach medzi neutrónmi a jadrami, ktorých kinetická energia je zanedbateľná vzhľadom na kinetickú energiu neutrónov.
- Letargia  $u = \ln(E_0/E)$ , kde  $E_0$  je referenčná energia a  $E$  je aktuálna kinetická energia neutrónu.
  - Pre  $E_0=2\text{MeV}$ ,  $E_n=0,025\text{ eV}$ , bude  $u=18$
  - Počet zrážok potrebných na spomalenie neutrónu:

$$n = \frac{u}{\xi}$$

32






## Voda

- Voda sa používa nielen ako moderátor, ale vďaka veľkému obsahu vodíkových atómov aj ako ochranný materiál - absorbátor.
- Po niekoľkých zrážkach s atómami vodíka sa neutróny rýchlo spomalia do tepelných energií a absorbujú sa.
- Pri absorpcii tepelných neutrónov jadrami vodíka pri reakcii  $H(n,\gamma)D$  vznikajú záchytné fotóny  $\gamma$ , ktorých energia  $E = 2,23 \text{ MeV}$ . Ich množstvo možno znížiť doplnkovou ochranou, napr. použitím boritej vody. V takom prípade budú tepelné neutróny absorbované bórom podľa reakcie  $B(n,\alpha)Li$ . Záchytné žiarenie bude mať energiu  $0,5 \text{ MeV}$ . Boritá voda je však silný korozívny materiál.


33



## Oceľ

- Oceľ je základný konštrukčný materiál reaktorov. Má dobré konštrukčné aj mechanické vlastnosti. V porovnaní s olovenou ochranou je oceľová ochrana pred gama žiarením o 30% ťažšia. Pre ochranu pred neutrónmi je oceľová v porovnaní s olovenou účinnejšia.
- Železo, ktoré oceľ obsahuje, sa aktivuje, vzniká pritom izotop  $^{59}Fe$ , ktorý emituje fotóny o energii  $1,1 \text{ MeV}$  a  $1,29 \text{ MeV}$ . Okrem toho vzniká záchytné žiarenie s energiou  $E = 7,7 \text{ MeV}$ .
- Prímesi, ktoré oceľ obsahuje (Co, Mn, Ta), môžu byť tiež aktivované. V oceli by mangánu nemalo byť viac ako 0,2%, kobalt a tantal by mal byť prítomný iba v stopových množstvách.


34



## Betón

- Betón je základným ochranným materiálom. Obsahuje rôzne plnivá, navzájom spojené cementom. Sú to najmä kysličníky Ca, Si, Al, Fe a ľahké jadrá, ktoré účinne pohlcujú žiarenie a spomaľujú rýchle neutróny pri pružných a nepružných zrážkach.
- Zoslabovanie toku neutrónov závisí od obsahu vody v materiále, z ktorého ochrana pozostáva.
- Absorbovanie neutrónového toku v betónovej ochrane možno zlepšiť pridaním do nej zlúčenín bóru. Najčastejšie sa používa karbid bóru  $B_4C$ .


35



## Grafit

- Grafit má výborné tepelné vlastnosti, je dobrým **moderátorom i reflektorom**. Je ľahko obrábatel'ný. Jeho nevýhodou je, že po ožiarení neutrónmi sa jeho kryštalická mriežka narúša, čo mení jeho mechanické vlastnosti.


36



## Kadmium

- Kadmium vynikajúco pohlcuje neutróny o energii menšej ako 0,5 eV.
- Vrstva kadmia o hrúbke 1 mm zníži tok tepelných neutrónov  $10^9$  krát, pričom vzniká záchytné žiarenie o energii 7,5 MeV.
- Nemá dobré mechanické vlastnosti. Častejšie ho z týchto dôvodov používajú v zliatine s olovom.

37




## Polyetylén

- Polyetylén  $(CH_2)_n$  obsahuje väčšie množstvo **vodíkových atómov** v jednotke objemu ako voda, preto je lepší moderátor.
- **Mäkne** pri  $115^\circ\text{C}$ , čo obmedzuje jeho použitie v reaktore.
- Pri vyšších teplotách **horí**, pričom vzniká voda a  $\text{CO}_2$ .
- Jeho lineárna roztťažnosť je 13 krát väčšia, ako u železa.
- Je dobre **tvarovateľný**.
- Kvôli zníženiu záchytného žiarenia sa do polyetylénu pridávajú zlúčeniny, obsahujúce bór. Komerčne je z takého materiálu dostupný tzv. "**neutrónstop**".

38






## Parafín

- Parafín podobne ako polyetylén sa používa na spomaľovanie rýchlych neutrónov.

### Záver

- Najčastejšie sa používa kombinovaná ochrana.
- Optimálnymi sú kombinácie ťažkých materiálov s látkami s vysokým obsahom vodíka, napr.: Pt, Os, Ir, Rh s polyetylénom alebo parafínom, Cd + polyetylén alebo parafín, W + H<sub>2</sub>O a i.

39



40