

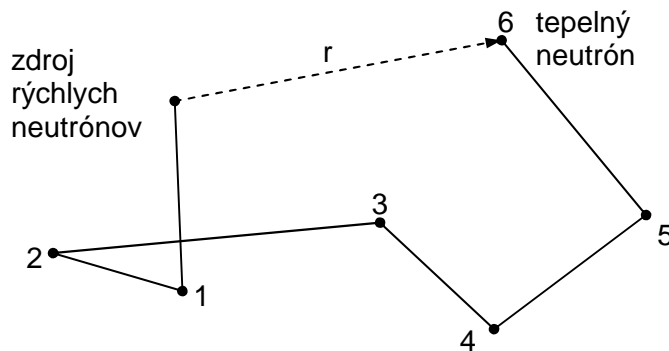
## 26. Určenie Fermiho veku neutrónov

### 1. Všeobecná časť

Fermiho vek neutrónov je významná veličina charakterizujúca spomaľovanie neutrónov v jadrových reaktoroch na tepelných neutrónoch. Označuje sa  $\tau$ . Pri odvodzovaní rovnice starnutia, ktorá popisuje hustotu spomaľovania  $q$  ako funkciu polohy a energie neutrónov, bola zavedená veličina Fermiho veku neutrónov nasledovným vzťahom (za predpokladu, že  $\Sigma_s \gg \Sigma_a$ ):

$$\tau = - \int_E^{E_0} \frac{D(E') dE'}{\xi \Sigma_s(E') E'} \quad (26.1)$$

Rýchle neutróny sa v prostredí spomaľujú v dôsledku rozptylových zrážok s jadrami atómov prostredia. Pri týchto zrážkach sa energia neutrónov postupne znižuje, až na zadanú hodnotu, pričom sa neutrón vzdialil od miesta svojho vzniku o  $r$ .



Obr. 26.1: Dráha neutrónu počas spomaľovania z energie  $E_0$  na  $E$ .

Stredná hodnota štvorca vzdialenosti, do ktorej sa neutrón pri spomaľovaní dostane, je priamo úmerná Fermiho veku neutrónov. Spojitosť medzi nimi je vyjadrená vzťahom:

$$\overline{r^2(E)} = 6\tau(E) \quad (26.2)$$

Fermiho vek neutrónov je teda jedna šestina stredného štvorca vzdialenosti, ktorú neutrón prejde od okamihu vzniku s energiou  $E_0$  až dotedy, kým sa spomalí na zadanú hodnotu

energie  $E$ . V izotropnom prostredí je rozloženie hustoty spomaľovania neutrónov  $q(r, E)$  v okolí bodového zdroja guľovo symetrické a závisí od vzdialenosti zdroja. Hustota spomaľovania neutrónov  $q(r, E)$  nám udáva počet neutrónov, ktoré sa v jednotke objemu, nachádzajúcom sa v mieste  $r$ , spomalia pod zadanú hodnotu energie  $E$  za jednotku času. Pretože neutróny sa od zdroja šíria všetkými smermi s rovnakou pravdepodobnosťou, môžeme nájsť množstvo neutrónov, ktoré sa spomalia na zadanú hodnotu energie  $E$  a pritom sa vzdialia od zdroja do vzdialenosti  $r$ , ako súčin  $q(r, E)$  a objemu guľovej škrupiny s polomerom  $r$  a hrúbkou  $dr$  t. j.  $q(r, E) 4\pi r^2 dr$ . Práve uvedený vzťah použijeme ako rozdeľovaciu funkciu vo vzťahu pre výpočet stredného štvorca vzdialenosti, do ktorej sa neutrón pri spomaľovaní dostane:

$$\overline{r^2(E)} = \frac{\int_0^{\infty} r^2 q(r, E) 4\pi r^2 dr}{\int_0^{\infty} q(r, E) 4\pi r^2 dr} = 6\tau_{th} \quad (26.3)$$

Fermiho vek neutrónov  $\tau$  priamo súvisí s chronologickým vekom neutrónov. Chronologickým vekom neutrónov rozumieme čas, ktorý uplynie od okamihu, keď neutrón opustí zdroj, až do okamihu, keď nadobudne zadanú energiu  $E$ . V nulovej vzdialenosti od zdroja sa hodnota  $\tau$  rovná nule a vzrastá s časom spomaľovania neutróna alebo poklesom energie. V tepelných reaktoroch je potrebné poznať hodnotu Fermiho veku neutrónov, ktoré sa spomalili na tepelnú hodnotu, túto veličinu označujeme  $\tau_{th}$ . Fermiho vek neutrónov  $\tau_{th}$  je tým menší, čím intenzívnejšie dané prostredie neutróny spomaľuje a naopak. Veličina  $\tau_{th}$  teda charakterizuje materiálové vlastnosti prostredia, v ktorom sa neutróny šíria. V procese spomaľovania neutrónov v jadrových reaktoroch závisí od veľkosti Fermiho veku neutrónov pravdepodobnosť ich úniku mimo štiepne prostredie. Preto sa v reaktorovej fyzike určeniu tejto veličiny venuje náležitá pozornosť.

## 2. Zadanie a postup merania

Stredný štvorec vzdialenosti spomaľovania, ktorý je priamo úmerný Fermiho veku neutrónov, možno určiť pomocou detektora neutrónov tieneného fóliami, ktoré vymedzujú neutróny s energiou 1,46 eV. Detektor postupne umiestňujeme do vymedzených polôh pozdĺž osi  $z$  za účelom určenia rozloženia hustoty neutrónov uvedenej energie v okolí

bodového zdroja rýchlych neutrónov typu Pu–Be. Neutróny sa v našom prípade spomaľujú v grafitovom prostredí v tvare Sigma–prizmy. Prostredie je natoľko veľké, že môžeme zanedbať vplyv úniku spomaľujúcich sa neutrónov na veľkosť Fermiho veku neutrónov. Z praktických dôvodov je najzaujímavejšia veľkosť štvorca spomaľovania neutrónov do tepelnej energie  $\overline{r_{th}^2} = 6\tau_{th}$ . Ak by sme na meranie rozloženia neutrónov použili detektor tepelných neutrónov, určili by sme stredný štvorec celkovej vzdialenosti, do ktorej sa pôvodne rýchly neutrón dostane t. j.  $\overline{r^2} = 6M^2 = 6(L^2 + \tau_{th})$ . Inými slovami, na výsledok takéhoto merania vplýva aj proces difúzie tepelných neutrónov. Aby sme určili len  $\overline{r_{th}^2} = 6\tau_{th}$ , musíme určiť rozloženie hustoty neutrónov s diskretnou hodnotou energie bezprostredne nad tepelnou oblasťou, čo možno urobiť pomocou rezonančných filtrov. Obvykle sa pri meraní stredného štvorca dĺžky spomaľovania používajú indiové filtre s energiou 1,46 eV. V tenkej indiovej fólii ( $h < 10 \text{ mg/cm}^2$ ) pokrytej kadmiovou sa pohlť aspoň 95 % neutrónov s energiou 1,46 eV a 100 % neutrónov s energiou nižšou ako 0,625 eV. Označme počet takto zaregistrovaných impulzov detektora neutrónov  $N_{InCd}$ . Ak v tom istom mieste zopakujeme meranie, ale detektor tienime iba kadmiovou fóliou, detektor zaregistruje všetky neutróny s energiou väčšou ako 0,625 eV, čo označíme  $N_{Cd}$ . Keď navzájom odpočítame oba údaje, dostaneme počet neutrónov s energiou 1,46 eV, ktoré sú absorbované indiovou fóliou, čiže máme  $N_{In} = N_{Cd} - N_{InCd}$ . Preto pre počet neutrónov absorbovaných v indiovej fólii môžeme napísať vzťah úmernosti:

$$N_{In}(r) \approx \varphi(r, 1,46) \quad (26.4)$$

odkiaľ na základe definície stredného štvorca vzdialenosti spomalenia môžeme zapísať:

$$\frac{\int_0^{\infty} r^2 N_{In}(r) 4\pi r^2 dr}{\int_0^{\infty} N_{In}(r) 4\pi r^2 dr} = \overline{r_{1,46}^2} = 6\tau_{1,46} \quad (26.5)$$

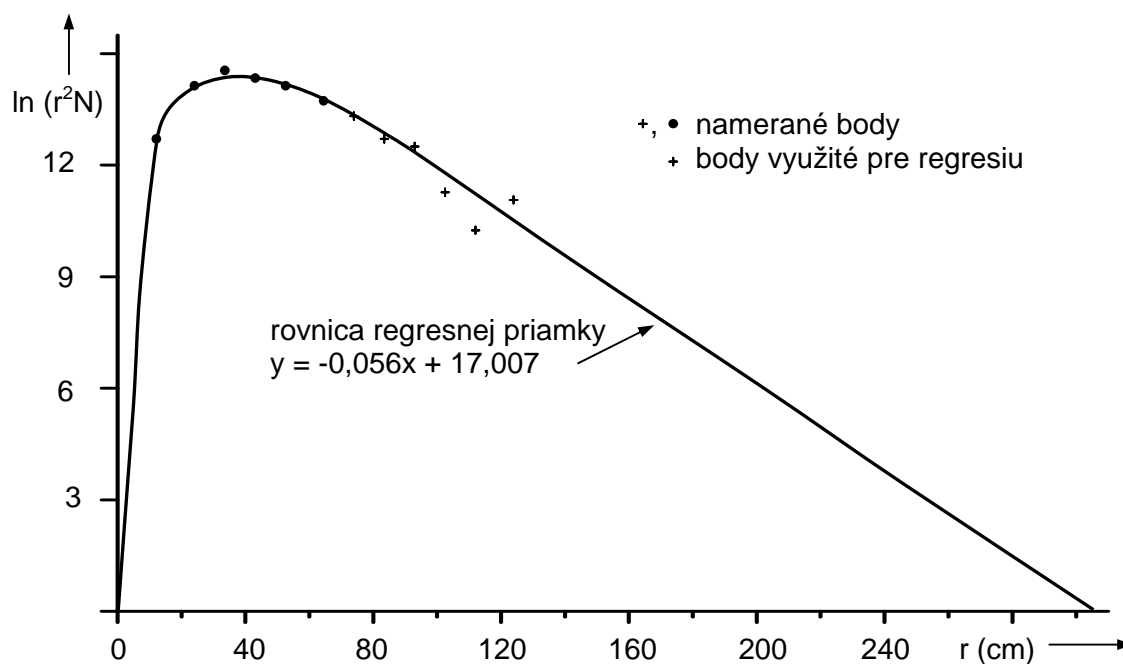
Poznamenávame, že takýmto spôsobom sme neurčili Fermiho vek neutrónov  $\tau_{th}$ , ale hodnotu  $\tau_{1,46}$ , určenú z rozloženia hustoty neutrónov s energiou 1,46 eV. Aby sme určili  $\tau_{th}$ , musíme zaviesť korekciu  $\Delta\tau^*$ , ktorú pripočítame k  $\tau_{1,46}$ . Hodnoty korekcie  $\Delta\tau^*$  pre niektoré materiály uvedené v tab. 26.1 (podľa Galanina a jeho spolupracovníkov).

Hodnota  $\Delta\tau^*$  pre vybrané materiály

Tab. 26.1

Materiál	H <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	Grafit
$\Delta\tau^*$ [cm <sup>2</sup> ]	0,43	3,7	1,7

Integrácia vo výraze (26.5) je robená od nuly do nekonečna, kým rozloženie hustoty neutrónov sa môže prakticky merať len v konečnej oblasti grafitovej Sigma–prizmy. Vo väčšine prípadov je dostatočné vykonať merania rozloženia hustoty neutrónov v ohraničenej oblasti, pretože zmenu hustoty neutrónov vo veľkej vzdialenosti od zdroja neutrónov možno určiť dostatočne presne pomocou extrapolácie. Hore uvedené možno vysvetliť pomocou obr. 26.2, kde je zobrazená závislosť  $r^2N_{\text{In}}(r)$ , zmeraná pomocou indiových a kadmiových filtrov v blízkosti Pu–Be zdroja, umiesteného v grafitе.



Obr. 26.2: Funkcia  $r^2N_{\text{In}}(r)$  zmeraná pomocou indiovej a kadmiovej fólie v závislosti od vzdialenosti zdroja Pu–Be v grafitе.

Ako vyplýva zo závislosti na obr. 26.2, vo veľkej vzdialenosti od zdroja neutrónov je zmena  $r^2N_{\text{In}}(r)$  rýdzo exponenciálna, takže platí:

$$r^2N_{\text{In}}(r) \approx e^{-\Sigma r} \quad (26.6)$$

Potom z (26.6) určíme závislosť  $N_{\text{In}}(r)$  mimo geometrické rozmery prizmy nasledovne:

$$N_{\text{In}}(r) \approx \frac{e^{-\Sigma r}}{r^2} \quad (26.7)$$

Z uvedeného je zrejmé, že merania  $N_{\text{In}}(r)$  je potrebné uskutočniť do takej vzdialenosti od zdroja, ktorá je dostatočná na určenie konštanty poklesu závislosti  $r^2 N_{\text{In}}(r)$ , ktorá je podľa (26.6) zhodná so  $\Sigma$ . Pre veľké vzdialenosti je potrebné urobiť extrapoláciu podľa (26.6).

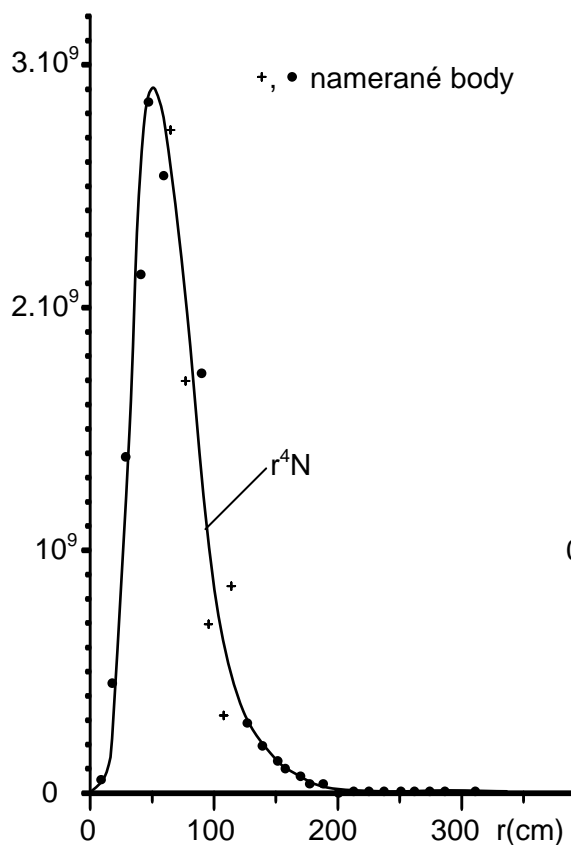
Vysvetlenie uvedenej zmeny je spojené s charakterom procesu spomaľovania pri prvých zrážkach vo veľkej vzdialenosti od zdroja neutrónov.

Procedúra potrebná na určenie  $\tau_{1,46}$  je nasledovná: najprv meraním určíme pre rôzne vzdialenosti od zdroja neutrónov  $N_{\text{In}}(r)$ . V semilogaritmických súradniciach zostrojíme závislosť  $r^2 N_{\text{In}}(r)$  a extrapolujeme lineárnu závislosť aj na miesta kde merania nebolo možné vykonať. Takto z grafu môžeme určiť závislosť  $N_{\text{In}}(r)$  pre všetky hodnoty  $r$ . Ďalej v lineárnych súradniciach zostrojíme závislosti  $r^4 N_{\text{In}}(r)$  a  $r^2 N_{\text{In}}(r)$  a integrujeme ich graficky v rozmedzí  $r = 0$  až  $r = \infty$ . Obe závislosti sú zobrazené na obr. 26.3 a 26.4.

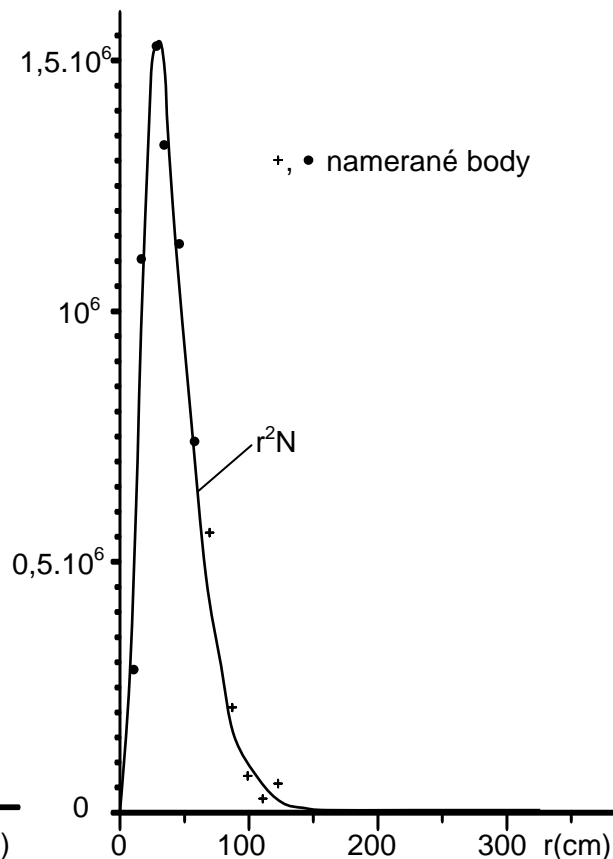
Podiel uvedených integrálov dáva podľa (26.5) hľadanú hodnotu veličiny  $\overline{r_{1,46}^2}$ .

Z grafitových tehál zostavená Sigma–prizma má rozmery 0,9 x 0,99 x 2 m<sup>3</sup>, je obložená kadmiovým plechom hrúbky 0,5 mm a tieniacim neutrónstopovým obkladovým materiálom. V čelnej stene je zhotovená sústava otvorov  $\phi=25$  mm vo vertikálnom smere s krokom 10 cm. Vo vzdialenosti 90 cm od zdroja je sústava horizontálnych otvorov rovnakého priemeru. Tu je možné stanoviť horizontálne rozloženie hustoty tepelných neutrónov. Na určenie stredného štvorca vzdialenosti spomaľovania neutrónov uskutočníme merania vo vzdialenosti od zdroja 10 až 130 cm. V dôsledku absorpcie tepelných neutrónov a účinnému spomaleniu rýchlych neutrónov prvými vrstvami grafitu, zaregistrujeme vo vzdialenosti väčšej ako 130 cm od zdroja iba veľmi málo neutrónov. Zaradením týchto meraní s nízkou početnosťou do súboru nameraných hodnôt by zväčšilo štatistickú chybu celého merania.

Ako sme už v predchádzajúcom uviedli v každej pozícii urobíme dve merania a to s detektorom pokrytým Cd fóliou (údaj  $N_{\text{Cd}}$ ) a kombinovaným pokrytím Cd – In (údaj  $N_{\text{InCd}}$ ). Množstvo neutrónov s energiou 1,46 eV určíme zo vzťahu  $N_{\text{In}} = N_{\text{Cd}} - N_{\text{InCd}}$ . Namerané hodnoty zaznamenáme do tab. 26.2.



Obr. 26.3: Funkcia  $r^4 N_{\text{In}}(r)$



Obr. 26.4: Funkcia  $r^2 N_{\text{In}}(r)$

Tabuľka nameraných hodnôt

Tab. 26.2

Poradové číslo merania	Vzdialenosť od zdroja [cm]	$N_{\text{Cd}}$ [min <sup>-1</sup> ]	$N_{\text{InCd}}$ [min <sup>-1</sup> ]	$N_{\text{In}}$ [min <sup>-1</sup> ]

Vzhľadom na najmenšiu možnú štatistickú chybu merania vo väčších vzdialenostiach od zdroja volíme čas merania 3 min.

Na meranie použijeme korónový detektor plnený  $\text{BF}_3$ . Tento detektor účinne registruje tepelné neutróny, jeho účinnosť registrácie klesá s rastom energie neutrónov. Pri registrácii neutrónov s energiou 1,46 eV poskytuje detektor vyhovujúce výsledky. Presnosť nášho merania možno zvýšiť použitím detektora pracujúceho v proporčionálnej oblasti s náplňou  ${}^3_2\text{He}$ . Takýto detektor má pri energii neutrónov 1,46 eV podstatne vyššiu účinnosť ako korónový detektor s  $\text{BF}_3$ .

Vlastný detektor je pripojený na jednokanálový analyzátor typ NT 350, ktorý obsahuje napájaci zdroj vysokého napätia, umožňuje nastaviť vhodný pracovný režim merania. Namerané výsledky vyhodnocujeme na PC s použitím programu "FERMIHO VEK NEUTRÓNOV". Program je napísaný tak, že si postupne pýta namerané hodnoty. Po zadaní všetkých údajov program uskutoční vyhodnotenie.

### **3. Literatúra**

[1] Bekurtz, K. H., Wirtz, K.: Neutron Physics. Heidelberg, Springer-Verlag 1964.

[2] Heřmanský, B.: Jaderné reaktory. Praha, SNTL 1981.