

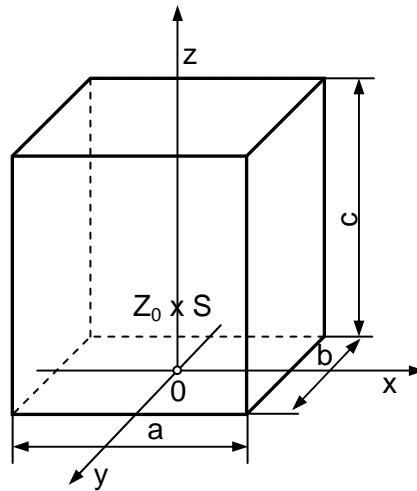
27. Meranie difúznej dĺžky tepelných neutrónov

1. Všeobecná časť

Šírenie tepelných neutrónov v prostredí charakterizujú účinné prierezy rozptylu Σ_s , absorpcie Σ_a , difúzny koeficient D a difúzna dĺžka L . Difúzna dĺžka je definovaná vzťahom $L = \sqrt{D/\Sigma_a}$ a fyzikálne vyjadruje mieru vzdialenosti v priamom smere, do ktorej sa tepelný neutrón dostane od miesta vzniku až po jeho absorpciu. Všetky metódy priameho experimentálneho určenia difúznej dĺžky tepelných neutrónov sú založené na meraní priestorového rozloženia tepelných neutrónov v prostredí neobsahujúcom vnútorné zdroje neutrónov. Obzvlášť jednoducho možno úlohu riešiť v prostredí s rozmermi, pri ktorých sú absorbované prakticky všetky tepelné neutróny pochádzajúce zo zdroja. Na vytvorenie „nekonečne veľkého“ prostredia treba, aby jeho efektívny priemer bol približne 30–násobkom difúznej dĺžky. Vytvoriť takéto prostredie prakticky možno iba z vody (H_2O) a niektorých látok obsahujúcich vodík. V prípade moderátorov, ako sú grafit alebo ťažká voda (D_2O), sa experimenty uskutočňujú v prostrediach, ktorých geometrické rozmery sú porovnateľné s difúznou dĺžkou, v dôsledku čoho treba uvažovať aj únik neutrónov z prostredia. Jednou z používaných metód merania difúznej dĺžky je metóda „Sigma–prizmy“, ktorá pozostáva z neštiepneho materiálu, ktorého difúznou dĺžku chceme určiť. Prierez Sigma–prizmy býva obdĺžnikový alebo kruhový. Neutróny do nej vstupujú jednou z jej stien, alebo sú emitované bodovým zdrojom umiestneným vo vnútri objemu neďaleko jednej zo stien.

Rozoberieme prípad Sigma–prizmy v tvare hranola s rozmermi a , b , c pozostávajúcej z grafitu (obr. 27.1). Začiatok súradnicového systému umiestnime v strede spodnej steny. Zdroj rýchlych neutrónov sa nachádza v bode $(0, 0, Z_0)$. Zdrojom rýchlych neutrónov je Pu–Be s výdatnosťou $Q = 1,06 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$ do 4π priestorového uhla, stredná energia neutrónov $\bar{E} = 5 \text{ MeV}$. Pre určenie difúznej dĺžky tepelných neutrónov je nevyhnutné zmerať priestorové rozloženie hustoty toku tepelných neutrónov, porovnať ho s teoretickým, čím určíme hľadanú veľkosť difúznej dĺžky. Analytické vyjadrenie priestorového rozloženia hustoty toku tepelných neutrónov vznikajúcich v dôsledku spomalenia rýchlych neutrónov v skúmanom prostredí je vo všeobecnom prípade veľmi zložitá, takže ho nemôžeme použiť pri výpočtoch pomocou bežnej malej výpočtovej techniky. Preto vyhodnocujeme iba tie merania, ktoré sú urobené v dostatočnej vzdialenosti od zdroja neutrónov, kde už nie sú rýchle neutróny. V tejto oblasti je priestorové rozloženie hustoty toku neutrónov opísané

dostatočne jednoduchým analytickým vzťahom. Vylúčiť vplyv rôznych neutrónov môžeme aj experimentálne pomocou metódy kadmiového rozdielu.



Obr. 27.1: Grafitová Sigma – prizma.

V ďalšom odvodíme výraz opisujúci rozloženie hustoty toku tepelných neutrónov v časti hranola nachádzajúcej sa nad zdrojom neutrónov a vzdialenej od neho tak, že v tomto priestore sa nachádzajú iba tepelné neutróny. Priestorové rozloženie hustoty toku tepelných neutrónov je v nemnoživom prostredí, časovej nepremenlivosti výdatnosti zdroja neutrónov opísané diferenciálnou rovnicou difúzie tvaru:

$$D\Delta\varphi(xyz) - \Sigma_a\varphi(xyz) = 0 \quad (27.1)$$

alebo po úprave:

$$\Delta\varphi(xyz) - \frac{1}{L^2}\varphi(xyz) = 0 \quad (27.2)$$

kde $\varphi(xyz)$ je priestorové rozloženie hustoty toku tepelných neutrónov [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$], D – difúzny koeficient [cm], Σ_a – makroskopický účinný prierez absorpcie [cm^{-1}], L – difúzna dĺžka.

Jednorozmerné riešenie difúznej rovnice (27.2) je vymedzené okrajovými podmienkami:

$$\varphi\left(\pm\frac{a_e}{2}, yz\right) = 0, \varphi\left(x \pm \frac{b_e}{2}, z\right) = 0, \varphi\left(xy \pm \frac{c_e}{2}\right) = 0 \quad (27.3)$$

kde a_e , b_e , c_e sú extrapolované rozmery hranola, $a_e = a + 2d$; $b_e = b + 2d$; $c_e = c + 2d$ a d je extrapolovaná vzdialenosť vo vákuu.

Rovnicu (27.2) riešime separáciou premenných $\varphi(xyz) = X(x)Y(y)Z(z)$. Po dosadení posledného výrazu pre hustotu toku neutrónov do rovnice (27.2) obdržíme:

$$\frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + \frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} = \frac{1}{L^2} \quad (27.4)$$

Ľavá strana rovnice (27.4) obsahuje tri členy, každý z nich je závislý od jednej nezávislej premennej, ktoré sa spolu rovnajú konštante $1/L^2$, t. j. každý zo sčítancov na ľavej strane sa tiež rovná konštante, a to:

$$\begin{aligned} \frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} &= -K_1^2 & \text{kde } K_1^2 > 0 \\ \frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} &= -K_2^2 & \text{kde } K_2^2 > 0 \\ \frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} &= K_3^2 & \text{kde } K_3^2 > 0 \end{aligned} \quad (27.5)$$

Potom platí $-K_1^2 - K_2^2 + K_3^2 = 1/L^2$. Pre konštantu K_3^2 platí $K_3^2 > |K_1^2 + K_2^2|$, pretože $1/L^2 > 0$. Konkrétne hodnoty konštant K_1 , K_2 a K_3 obdržíme riešením sústavy rovníc (27.5) a použitím okrajových podmienok (27.3). Riešenie sústavy rovníc (27.5) má nasledovný všeobecný tvar:

$$\begin{aligned} X(x) &= A_1 \cos K_1 x + C_1 \sin K_1 x \\ Y(y) &= A_2 \cos K_2 y + C_2 \sin K_2 y \\ Z(z) &= A_3 \exp(K_3 z) + C_3 \exp(-K_3 z) \end{aligned} \quad (27.6)$$

Z podmienky symetrie rozloženia hustoty toku neutrónov okolo osi x a y vyplýva, že konštanty $C_1 = C_2 = 0$ nakoľko $dX(0)/dx = 0$ ako aj $dY(0)/dy = 0$. Z okrajových podmienok na extrapolovanej hranici (27.3) platí $A_3 = -C_3 \exp(-2K_3 c_e)$. Z okrajových podmienok na extrapolovanej hranici (27.3) taktiež vyplývajú nasledovné výrazy konštant $K_1 = \frac{\pi}{a_e} (2n + 1)$ a $K_2 = \frac{\pi}{b_e} (2m + 1)$, kde $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ a $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. Potom rovnica (27.2) má nasledovné riešenie:

$$\varphi(xyz) = \sum_{m,n=0}^{\infty} C_{mn} (\cos K_{1n} x) (\cos K_{2m} y) \exp(-2K_{3mn} (c_e - z)) \quad (27.7)$$

kde $C_{mn} = c_1 c_2 c_3$ a pre konštantu K_{3mn}^2 platí nasledovný vzťah:

$$K_{3mn}^2 = \frac{1}{L^2} + K_{1n}^2 + K_{2m}^2 \quad (27.8)$$

Zo vzťahov (27.7), (27.8) a výrazov pre konštanty K_1 , K_2 je zrejmé, že príspevok vyšších harmonických zložiek do radu (27.7) prudko klesá s rastúcou z-tovou súradnicou. Preto dostatočne ďaleko od zdroja neutrónov vzťah (27.7) má tvar (berieme prvú harmonickú pre $n = 0$ a $m = 0$ vo výrazoch pre K_1 , K_2):

$$\varphi(xyz) = C_{00} (\cos K_{10} x) (\cos K_{20} y) \exp[-K_{300} z] [1 - \exp(-2K_{300}(c_e - z))] \quad (27.9)$$

Priestorové rozloženie hustoty toku tepelných neutrónov v látkovom prostredí v tvare hranola je dané na jednej strane geometriou a spektrom neutrónov emitovaných zdrojom a z druhej strany rozmermi hranola, procesmi spomaľovania a difúzie neutrónov v celom jeho objeme. Ako už bolo uvedené, v dostatočnej vzdialenosti od zdroja na priestorové rozloženie hustoty toku tepelných neutrónov vplyvajú iba geometrické rozmery hranola a proces difúzie tepelných neutrónov, v dôsledku čoho pre rozloženie hustoty toku neutrónov platí vzťah (27.9). Na meranie difúznej dĺžky môžeme použiť zdroj rýchlych neutrónov iba vtedy, ak hustota spomaľovania neutrónov klesá prudšie ako hustota toku tepelných neutrónov v skúmanom prostredí, t. j. $\sqrt{\tau} < L$.

Môžeme predpokladať, že ak priestorová závislosť hustoty toku tepelných neutrónov je od určitej vzdialenosti z od zdroja neutrónov vyjadrená vzťahom (27.9), potom aj pri použití bodového zdroja rýchlych neutrónov v uvedenej oblasti hranola bude rozloženie hustoty toku tepelných neutrónov opísané vzťahom (27.9) s dostatočnou presnosťou.

Zo vzťahu (27.9) vyplýva, že pri použití hranola s $c_e \rightarrow \infty$ pre $Z(z)$ môžeme napísať:

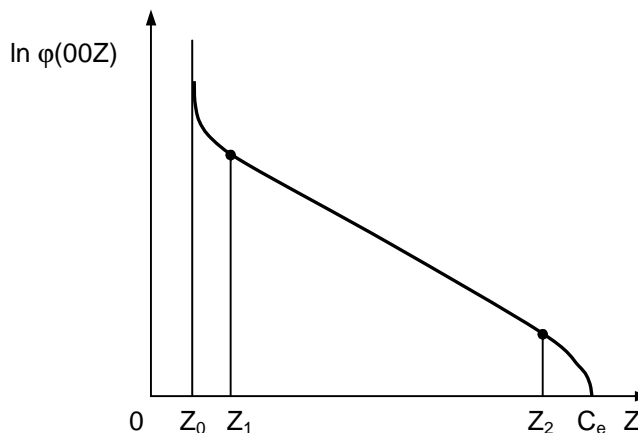
$$Z(z) = C \exp[-K_3 z] \quad (27.10)$$

To znamená, že súčiniteľ $[1 - \exp(-2K_{300}(c_e - z))]$ vyjadruje vplyv hornej steny hranola na priestorové rozloženie hustoty toku tepelných neutrónov. Ak je vzdialenosť od hornej steny ($c_e - z$) niekoľkonásobok relaxačnej dĺžky tepelných neutrónov $1/K_{300}$, potom vplyv hornej steny možno zanedbať. Z uvedeného vyplýva, že závislosť rozloženia hustoty toku tepelných neutrónov od z v hranole má tvar zobrazený na obr. 27.2. V blízkosti zdroja je φ opísaná nekonečným radom (27.7), potom nasleduje časť $z_1 \div z_2$, kde je zmena φ rýdzo exponenciálna (27.10) a potom sa prejaví vplyv hornej steny, tu platí vzťah (27.9).

Na určenie difúznej dĺžky sa z merania závislosti $\varphi(00z)$ využije lineárna časť zmeny $\ln\varphi(00z)$, z nej sa určí smernica K_{300} . Po experimentálnom stanovení K_{300} , vypočítame difúznu dĺžku zo vzťahu:

$$\frac{1}{L^2} = K_{300}^2 - \left(\frac{\pi}{a_e}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{b_e}\right)^2 \quad (27.11)$$

Extrapolované rozmery a_e a b_e môžeme určiť niekoľkými spôsobmi. Môžeme ich napríklad určiť z merania priestorového rozloženia hustoty tepelných neutrónov $X(x)$ a $Y(y)$ v mieste, kde už nevplyvajú rýchle neutróny. Z týchto závislostí určíme a_e a b_e graficky, alebo metódou najmenších štvorcov.

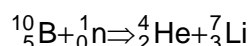


Obr. 27.2: Závislosť rozloženia hustoty toku tepelných neutrónov v smere osi z.

2. Zadanie a postup merania

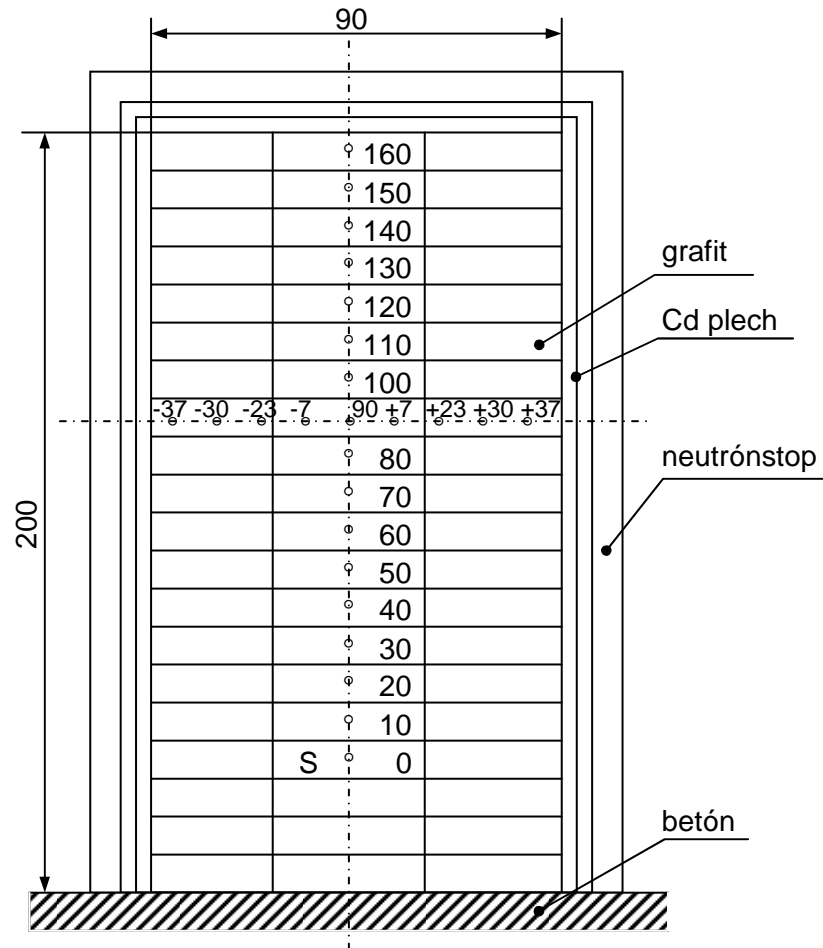
Experimentálne zariadenie pozostáva z grafitovej Sigma–prizmy, korónového detektora neutrónov plneného BF_3 a jednonábového analyzátoru typu NT 350 určeného na nastavenie pracovného režimu a registráciu impulzov z detektora. Sigma–prizma má tvar hranola s rozmermi $a = 90$ cm, $b = 99$ cm, $c = 200$ cm, je poskladaná z grafitových elektrolyzných elektród s rozmermi $10 \times 30 \times 49,5$ cm³. V čelnej stene hranola sú vyvŕtané otvory $\phi 25 \times 495$ mm, do ktorých sa po vybratí grafitovej zátky vkladá detektor neutrónov. Rozmiestnenie otvorov v smere osi x a y je zrejme z obr. 27.3.

V dolnom otvore umiestnenom 35 cm od dolnej steny prizmy je umiestnený Pu – Be zdroj rýchlych neutrónov. Horizontálny rad otvorov slúži na zistenie rozloženia hustoty tepelných neutrónov v rovine xy (vo vzdialenosti 90 cm od zdroja) a je potrebný na experimentálne určenie extrapolovanej dĺžky d vo vákuu. Ako detektor neutrónov sa používa korónový detektor typu CHM–11, plnený plynom s obsahom BF_3 . Neutróny sú registrované na základe jadrovej reakcie:



Produkty reakcie ionizujú náplň detektora, čo spôsobí napäťový impulz, ktorý je zaregistrovaný elektronickou aparátúrou.

Ako je zrejmé zo vzťahu (27.11), na výpočet difúznej dĺžky je potrebné poznať veľkosti K_{300} , a_e a b_e . Na určenie hodnoty K_{300} treba zmerať rozloženie hustoty tepelných neutrónov v smere osi z.



Obr. 27.3: Vertikálny rez grafitovou Sigma–prizmou.

Na určenie rozmerov a_e , b_e je potrebné vykonať meranie rozloženia hustoty tepelných neutrónov v rovine xy vzdialenej od zdroja 90 cm. V každom bode robíme dve merania po 120 s. Jedno meranie sa robí bez zaclonenia detektora neutrónov kadmiovou fóliou a druhé so zaclonením. Výsledná hodnota úmerná hodnote hustoty toku tepelných neutrónov v danom mieste je určená rozdielom N , merania bez zaclonenia N_h a merania so zaclonením N_{Cd} . Týmto spôsobom je experimentálne vylúčený vplyv nadtepelných neutrónov na meranie. Získanú závislosť takto vykonaných meraní $N(z) = N_h(z) - N_{Cd}(z)$ vynesieme do grafu v semilogaritmických súradniciach. Z lineárnej časti určíme pomocou lineárnej regresie K_{300} . Z rozloženia hustoty neutrónov v horizontálnej rovine určíme a_e a z neho ďalej extrapolovanú vzdialenosť $d = a_e/2 - a/2$. Následne pomocou d určíme hodnotu b_e a zo

vzťahu (27.11) vypočítame difúznú dĺžku. Namerané výsledky vyhodnotíme na PC. Vyhodnocovací program obsahuje opis zadávania nameraných hodnôt, okrem výsledkov vyhodnotenia, zobrazuje závislosti $N(z)$ a $N(x)$.

3. Literatúra

- [1] Haščík, J., Sitek, J.: Atómové reaktory. Bratislava, ES SVŠT, 1981.
- [2] Glastone, S., Edlund, M. C.: Základy teórie jaderných reaktorů. Praha, SNTL, 1958.
- [3] Bekurtz, K. M., Wirtz, K.: Neutron Physics. Heidelberg, Springer-Verlag, 1964.