

## 23. Neutrónová aktivačná analýza

### 1. Všeobecná časť

Neutrónová aktivačná analýza sa v súčasnosti široko používa vo výskumnej praxi aj v priemysle. Základom neutrónovej aktivačnej analýzy sú jadrové reakcie vyvolané priamym pôsobením neutrónov. Pod pôsobením neutrónov vo všeobecnosti dochádza ku vzniku nového (zostatkového, dcérskeho) jadra, ktoré je vo väčšine prípadov nestabilné a podlieha následnému rozpadu. Určením charakteristík tohto umelopripraveného jadra je možné stanoviť prítomnosť pôvodných (materských) jadier v skúmanej vzorke.

Pre praktické použitie aktivačnej analýzy sú potrebné neutrónové zdroje. Najdôležitejším parametrom týchto zdrojov je **výdatnosť neutrónového zdroja**,  $Q$ , definovaná ako množstvo neutrónov produkovaných za jednotku času. Najvhodnejšie sú zdroje s čo najväčším neutrónovým tokom v mieste ožarovania. V tabuľke 23.1 sú uvedené najčastejšie používané zdroje neutrónov, ich základná reakcia vzniku a typická výdatnosť.

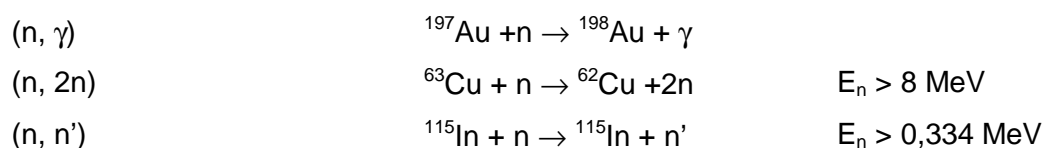
Charakteristiky najpoužívanejších neutrónových zdrojov

Tab. 23.1

Typ zdroja neutrónov	Reakcia vzniku neutrónov	Typická výdatnosť [ $s^{-1}$ ]
rádioizotopové spontánnoštiepne množiče neutrónov	$(\alpha, n)$ , $(\gamma, n)$ štiepenie $^{252}\text{Cf}$ , $^{242}\text{Cm}$ štiepenie $^{235}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$	$10^6 - 10^7$ , $10^4 - 10^5$ $10^9 - 10^{10}$ nad $10^8$
Urýchľovače	$(d, n)$ , $(p, n)$	$10^8 - 10^{10}$
Reaktorové impulzné	štiepenie $^{235}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$ štiepenie $^{235}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$	$10^{17}$ $8 \cdot 10^{18}$ (1/70 $\mu\text{s}$ ) priemerne $10^5$
jadrový výbuch	štiepenie	$10^{24}$ (1/0,1 $\mu\text{s}$ )

Ďalšou dôležitou charakteristikou neutrónovej aktivačnej analýzy je energia neutrónov používaných pri aktivácii. V zásade sa dá väčšina jadier aktivovať aj nízkoenergetickými fotónmi, avšak účinný prierez týchto reakcií pre nízke energie je malý. Najčastejšie sa používajú rýchle neutróny s energiami 0,5 – 20 MeV a neutróny tepelné s energiou 0,005 - 0,5 eV.

Vlastná aktivácia prebieha ako jadrová reakcia typu  $(n, \gamma)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, n')$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$  a pod. Typické príklady jednotlivých reakcií sú:



Pre všetky spôsoby aktivácie je dôležitá závislosť medzi aktivitou zostatkového jadra  $A_B$ , hustotou neutrónového toku  $\phi$ , účinným prierezom reakcie  $\alpha_A$ , pri ktorej vznikajú rádioaktívne jadrá, a počtom atómov  $N_A$  skúmaného izotopu vystaveného pôsobeniu neutrónov. Za predpokladu použitia tenkého terčička môžeme zanedbať závislosť  $\alpha_A$  od energie neutrónov. Rýchlosť akumulácie zostatkových jadier závisí od rýchlosti reakcie, pri ktorej vznikajú. Táto je určená vzťahom:

$$R = \alpha_A \phi N_A \quad (23.1)$$

Pre aktivitu zostatkových jadier potom platí:

$$\frac{\partial N_B}{\partial t} = \alpha_A \phi N_A - \lambda_A N_B \quad (23.2)$$

kde  $\lambda_A$  je rozpadová konštanta rádioaktívnych jadier B, ktorých počet vo vzorke je  $N_B$ .

Jednoduchým integrovaním výrazu (23.2) dostávame:

$$N_B = \frac{\alpha_A \phi N_A}{\lambda_A} [1 - \exp(-\lambda_A t)] \quad (23.3)$$

Veličinu  $R = \alpha_A \phi N_A$  zvykneme označovať aj pojmom nasýtená aktivita. Časová závislosť aktivity aktivovanej vzorky potom bude:

$$A_B = R [1 - \exp(-\lambda_A t)] \quad (23.4)$$

Zo vzťahu (23.4) je zrejmé, že doba ožarovania väčšia ako niekoľko polčasov rozpadu jadier typu B je zbytočná, pretože pritom dochádza už len k minimálnemu rastu aktivity. Zvyčajne sa volí doba ožarovania v rozsahu 1 – 4 polčasov rozpadu. Vhodným výberom ožarovacej doby sa niekedy značne zjednodušuje analýza zmesi, ktorej zložky majú odlišné polčasy rozpadu.

Vlastná analýza vzorky (určenie prítomnosti rôznych izotopov a prvkov) je založená na meraní charakteristiky rozpadu aktivovanej vzorky. Existuje niekoľko základných charakteristík, ktoré sa pri aktivačnej analýze používajú. Sú to tieto:

1. spôsob rozpadu podľa typu emitovaných častíc

2. energia emitovaných častíc
3. polčas rozpadu zostatkových jadier

V prírode sa nevyskytujú dva izotopy, ktoré by mali všetky tieto charakteristiky úplne rovnaké. Na základe nameraných hodnôt a ich porovnaním s tabuľkovými hodnotami potom možno určiť prítomnosť prvkov a ich izotopov vo vzorkách.

V praxi sa však pri neutrónovej aktivačnej analýze obmedzujeme len na určenie energie žiarenia gama pochádzajúceho z deexcitácie zostatkového jadra po jeho rozpade. Meranie tohto jedného parametra je postačujúce vo viac ako 90 % prípadov.

Okrem kvalitatívneho určenia prítomnosti izotopov sa aktivačná analýza používa aj pre kvantitatívne merania. Pri nich sa postupuje podobne, avšak merania zahŕňujú aj presné určenie indukovanej aktivity vzorky. Pre stanovenia zastúpenia skúmaného prvku sa potom používajú dve možné metódy. Pri priamej metóde sa na základe určenia absolútnej aktivity pri známych hodnotách  $\lambda_A$  a  $\phi$  určuje množstvo skúmaného prvku podľa vzťahu:

$$m = \frac{A(t_2) M}{L \phi \alpha_A \eta} \frac{\exp(-\lambda_A t_2)}{1 - \exp(-\lambda_A t_1)} \quad (23.5)$$

kde  $t_1$  je doba aktivácie,  $t_2$  je doba, ktorá uplynula od skončenia aktivácie po začiatok merania,  $A(t_2)$  je nameraná aktivita,  $M$  je mólová hmotnosť prvku,  $L$  je Avogadrovo číslo,  $\eta$  je relatívne zastúpenie izotopu v prirodzenej zmesi.

Oveľa častejšie sa však používa tzv. relatívna metóda. Pri nej sa porovnáva aktivita meranej vzorky s aktivitou etalónu aktivovaného za rovnakých podmienok. Množstvo skúmaného prvku v kalibračnej vzorke je známe ( $m_0$ ) a jeho množstvo vo vzorke určíme podľa vzťahu:

$$m = m_0 \frac{A_X}{A_0} \quad (23.6)$$

kde  $A_X$  je aktivita vzorky a  $A_0$  je aktivita etalónu po ožarovaní za rovnakých podmienok.

Citlivosť aktivačnej analýzy je limitovaná schopnosťou merať nízke aktivity, použitím neutrónových zdrojov s veľkým neutrónovým tokom a najmä veľkosťou účinného prierezu aktivačnej reakcie. Preto je citlivosť pre rôzne prvky značne odlišná.

## 2. Zadanie a postup merania

Cieľom úlohy je oboznámiť sa so základmi analytickej metódy, ktorá využíva na identifikáciu izotopov aktiváciu vzorky pôsobením neutrónového žiarenia. Aktiváciu vybraného prvku vykonajte podľa zásad uvedených vo všeobecnej časti. Pre stanovenie identifikácie nuklidov v ožiarených vzorkách použite vhodný spektrometer žiarenia gama, ktorý pred meraním treba presne okalibrovať (energetická kalibrácia) pomocou vhodných štandardov. Na energetickú kalibráciu použite zmes bodových žiaričov ( $^{137}\text{Cs}$  a  $^{60}\text{Co}$ ).

Pri samotnom riešení tejto úlohy postupujte nasledovne:

- 1) Aktivujte zvolený prvok s viacerými izotopmi.
- 2) Zmerajte pomocou spektrometra žiarenia gama jeho spektrum.
- 3) Určite pomer zastúpenia jednotlivých izotopov.
- 4) Aktivujte etalón vybraného prvku a neznámu vzorku.
- 5) Na základe pomeru aktivity žiarenia gama určite zastúpenie daného prvku v neznámej vzorke.
- 6) Stanovte neistotu výsledkov.

## 3. Literatúra

- [1] Cirák J.: Jadrovofyzikálne metódy a prístroje, Bratislava, EF SVŠT, 1986.  
[2] Usačev S. a kol.: Experimentálna jadrová fyzika, Bratislava, Alfa, 1982.  
[3] Florek M.: Neutrónová fyzika, Bratislava, MFF UK, 1979.