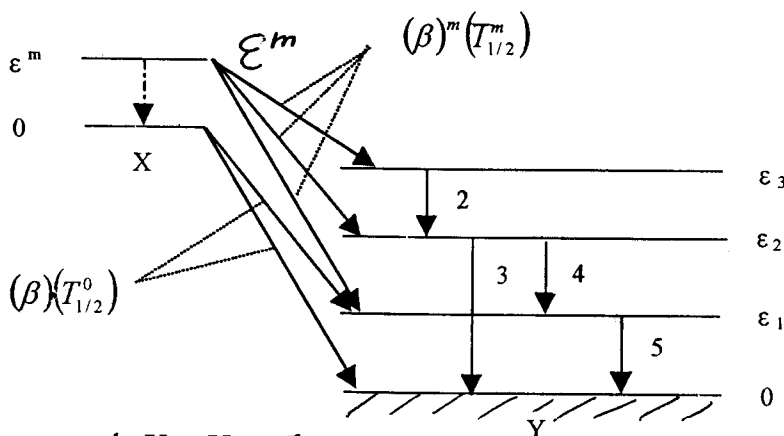


### I. Všeobecný úvod

Studium spekter  $\gamma$ -záření, následujícího po předchozím  $\beta$ - (nebo řidčeji  $\alpha$ -) rozpadu je velmi cenným zdrojem informací jak při aplikacích radionuklidů, tak zejména v samotné jaderné fyzice („jaderná spektrometrie“). Schematicky je proces  $\beta$ - a následujícího  $\gamma$ -rozpadu na obr.1. Jádru X přechází  $\beta$ -rozpadem do konkrétních stavů jádra Y ( $X \rightarrow Y$ ), které pak, s výjimkou základního stavu přecházejí do nižších stavů emisí  $\gamma$ -záření (přechody 1-5). Samotné jádro X se může rozpadat jak ze základního stavu (přechody  $(\beta)_0$ ) s poločasem rozpadu  $(T_{1/2})^0$ , tak z metastabilního (isomerního) vzbuzeného stavu  $X^m$  (přechody  $(\beta)_m$ ) s poločasem rozpadu  $(T_{1/2})^m$ .



Obr.1. Schéma rozpadu  $X \rightarrow Y \rightarrow \epsilon_\mu$

Protože spektrum  $\gamma$ -záření je pro daný nuklid Y plně určeno strukturou a vlastnostmi stavů v jádře tohoto nuklidu, je pro tento nuklid charakteristické a je možno spektrum využít k určení přítomnosti nuklidu X ve zkoumaném vzorku, ale ke studiu struktury jádra Y a vlastností konkrétních stavů v tomto jádře (excitační energie, spin, parita ap.) Princip je následující :

#### a) Aplikační práce:

Ve spektru  $\gamma$ -záření nuklidu Y zpravidla existují význačné (intenzivní) přechody nebo častěji jejich skupiny, které jsou pro daný nuklid Y zcela charakteristické. Jejich identifikace je tedy současně identifikací přítomnosti radionuklidu X ve vzorku. Jestli je navíc možno stanovit relativní intenzitu těchto přechodů vzhledem ke známému standardu, lze při splnění dalších experimentálních podmínek určit i poměrné zastoupení nuklidu X („koncentraci“).

#### b) Jaderná spektroskopie:

Při primárním rozpadu  $X \rightarrow Y$  vznikají jádra Y obecně ve vzbuzených stavech (mluvíme o „sycení“ těchto stavů), které se rozpadají do nižších stavů - viz obr. 1. (Pozor, vzbuzený stav se nemusí rozpadat přímo do základního stavu - viz výběrová pravidla pro elektromagnetické přechody v jádrech). Z vlastností odpovídajících přechodů (energie, intenzita, multipolarita) lze

získávat informace o konkrétních stavech. Např. na obr. 1. Bude zřejmě pro excitační energie stavu (2) platit relace

$$\varepsilon_2 = E_\gamma(3) = E_\gamma(4) + E_\gamma(5)$$

sérii následných přechodů, např. 2+4+5 na obr. 1, označujeme obvykle jako „kaskádu“. Z uvedené relace lze např. usoudit, že mezi stavy (0) a (2) existuje stav (1) s energií  $\varepsilon_0 < \varepsilon_1 < \varepsilon_2$  i když určení jeho energie nemusí být jednoznačné. Známe-li však větší počet kaskád nebo jiné informace (např. víme, že předcházející rozpad  $X \rightarrow Y$  vede k syčení určitých hladin v jádře Y), lze uspořádání stavů v jádře Y určit dostatečně věrohodně a energii řady hladin lze stanovit zcela jednoznačně. Uvážíme-li navíc výběrová pravidla pro  $\beta$  a  $\gamma$ -rozpad (např. (1)), lze z experimentálně určené intenzity přechodů určit nebo alespoň vymezit také spiny a paritu řady stavů v jádře Y.

Grafické znázornění rozpadu  $X \rightarrow Y \rightarrow \Sigma_\gamma$  se zařazenými přechody  $\beta$ , resp.  $\alpha$  i  $\gamma$  se označuje jako „rozpadové schéma nuklidu X“ - viz obr. 1.

Obvykle se v tomto schématu uvádějí i další informace, např. poločas rozpadu jádra X, známé spiny, parity a střední doby života participujících stavů v jádře X i Y, excitační energie hladin. Energie  $\gamma$  přechodů a pod. (viz příložená schémata rozpadu některých jader).

## II. Princip metody vydělení spekter

V praxi se radionuklidy X zpravidla připravují uměle pomocí jaderných reakcí  $X_0(a,b)X$  na terčíkovém jádru  $X_0$  s jádrem X ve výstupním kanále (proces se často označuje jako „aktivace“). Po době aktivace  $t_0$  je aktivita nuklidu X dána známým vztahem

$$A_x(t_0) = j_a \cdot \sigma_a \cdot N_{x_0} \cdot (1 - \exp(-t/\tau_x)) \quad (1)$$

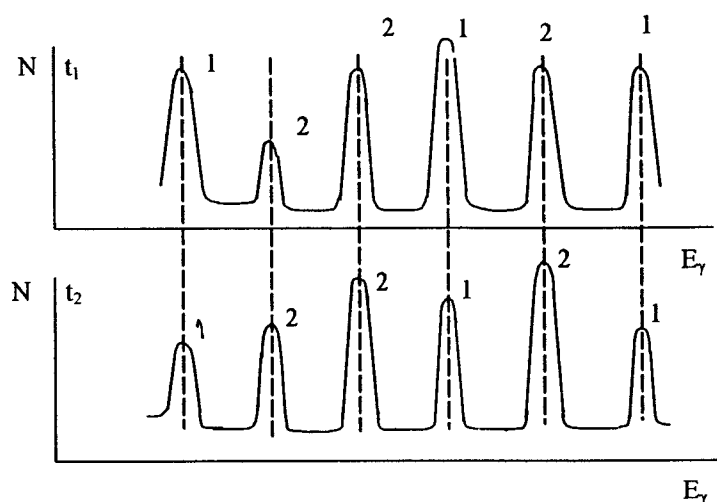
aktivita      když  $t = 0$  v  $t = t_0$  ??

kde  $j_a$  je hustota toku bombardujících částic  $a$ ,  $\sigma_a$  je aktivační - účinný průřez, odpovídající energii částic  $a$ ,  $A$  je celkový počet jader X ve vzorku a  $\tau_x$  je střední doba života nuklidu X. Zřejmě pro  $t_0 \gg \tau_x$  bude  $A_x(t_0) = j_a \cdot \sigma_a \cdot N_{x_0}$  („aktivita v nasycení“). Aktivita v čase  $t$  od ukončení aktivace je pak dána normálním rozpadovým zákonem.

$$A_x(t_0, t) = A_x(t_0) \cdot \exp(-t/\tau_x) \quad (2)$$

Pokud vzorek obsahuje větší počet nuklidů (prvek není monoizotopický nebo není vzorek hmotnostně separován), setkáváme se velmi často se situací, že ve zkoumaném vzorku je přítomno více radionuklidů vedoucích k emisi  $\gamma$ -záření. Výsledné  $\gamma$ -spektrum je potom složeno ze spekter jednotlivých nuklidů a zpravidla je značně složité. Přiřazení spekter konkrétním nuklidům je pak možno pouze při použití speciálních postupů. Jeden z nich, velmi často používaný, využívá různých dob života jednotlivých radionuklidů X.

Protože pokles aktivity radionuklidů X s časem  $t$  bude probíhat podle vztahu (2), bude podle stejného zákona postupně klesat také intenzita odpovídajících spektrálních čar ve spektru  $\gamma$ -záření. Pokud se střední doby života (resp. poločasy rozpadu  $T_{1/2}$ ) jednotlivých radionuklidů ve vzorku výrazně liší, lze tedy spektra konkrétních nuklidů vydělit na základě intenzity jednotlivých píků. Schématicky je situace znázorněna na obr. 2 pro dva radionuklidy označené „1“ a „2“ a pro  $\tau_1 < \tau_2$ , přičemž měření je v časech  $t_1$  s  $t_2$ ,  $t_1 < t_2$ ,  $t_2 - t_1 \geq \tau_1$ .

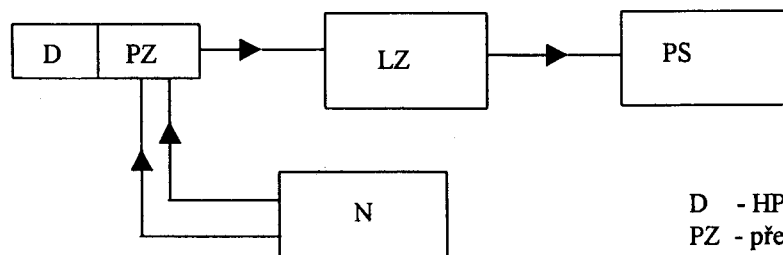


Obr.2. Spektrum směsi dvou radionuklidů v různých časech

Informace o spektrech nuklidů (1) a (2) lze získat srovnáním spekter, získaných v různých časech  $t$  od skončení aktivace vzorku. Zřejmě při měření v čase  $t \gg \tau_1$  bude spektrum  $\gamma$ -záření odpovídat prakticky čistému spektru nuklidu (2). Rovněž evidentní je skutečnost, že informace o spektru nuklidu (1) lze získat především z měření v čase  $t \leq \tau_1$ . Proto v případě, že  $\tau_1$  je velmi malé ( $\leq$  minuty), je nutno při měření zajistit velmi rychlou dopravu vzorku z místa aktivace ke spektrometru (např. pomocí pneumatické pošty). Dostatečně výrazná spektra lze pak získat např. mnohonásobným opakováním aktivace a měření a složením získaných spekter (přičemž každé měření je prováděno alespoň ve dvou stejně vzdálených časových intervalech vzdálených o  $\Delta t \geq \tau_1$ ).

### III. Cíl úlohy

Cílem úlohy je seznámit posluchače se základními principy a metodami jaderné spektrometrie  $\gamma$ -záření v případě, že ve vzorku je více radionuklidů. Měření je prováděno v uspořádání a s experimentální technikou, odpovídající dobrému standartu současné jaderné spektrometrie – velkoobjemový HPG spektrometr  $\gamma$ -záření spojený s registrací spekter pomocí počítače. Počítač rovněž umožňuje průběžné zpracování spekter i další operace s nimi (srovnávání, sumace apod.). Součástí úlohy je také využití získaných spekter k identifikaci jednoho z nuklidů a k sestavení rozpadového schématu druhého nuklidu.



D - HPG detektor (145 ccm)  
 PZ - předzesilovač  
 N - napájení PZ a VN zdroj  
 LZ - lineární zesilovač  
 PS - počítač se spektrometrickou kartou PCA

#### IV. Uspořádání úlohy a postup práce

Používané experimentální uspořádání je schématicky znázorněno na obr. 3. Podrobný popis práce s počítačem je ve výpisu z manuálu, který je v praktiku k dispozici.

Zesílení na LZ je předem nastaveno tak, aby registrovaná energie  $\gamma$ -záření  $E_\gamma$  odpovídá při použití osmi tisícikanálového uspořádání spektrometru rozsahu energií ve spektrech používaných radionuklidů. Rovněž nastavení VN je zpravidla provedeno před zahájením praktika.

292?

Měření je prováděno ve variantě 8128-kanálového analyzátoru. Vzorek, na němž jsou prováděna měření obsahuje 2 hlavní nuklidy a je připravován aktivací neutrony (tj. reakcí  $X_0(a, \Sigma_\gamma)X$  - radiální záchyt neutronů) na neutronovém zdroji KJF. Aktivita radionuklidů je dána vztahem (1) a je prakticky pro obal radionuklidy aktivitou v nasycení ( $t_0 \gg \tau_1, \tau_2$ ). Používaný vzorek je připravován aktivací nuklidu  $^{115}\text{In}$  a dalšího nuklidu  $(X_0)_2$ , jehož určení je jedním z úkolů práce.

#### Postup měření

##### 1. Energetická kalibrace

Při měření je spektrum  $\gamma$ -záření ukládáno do paměti počítače podle kanálů. K určení energie  $\gamma$ -záření je proto nutno stupnici v kanálech okalibrovat. K tomu slouží kalibrační vzorky s dobře známými energiemi přechodů (vnější kalibrace), nebo někdy, v případě přítomnosti v samotném spektru vzorku přechodů s dobře známými energiemi (např. známé příměsi), se využívá těchto přechodů (vnitřní kalibrace). V našem případě kalibrujeme pomocí vnějších zdrojů, používáme zářič  $^{226}\text{Ra}$ .

##### 2. Vlastní měření

Vlastní měření zahájíme ihned po skončení kalibrace. Vzorek uložený do té doby v neutronovém zdroji KJF (suterén TL) přineseme do praktika (za přítomnosti dozírajícího pracovníka) a umístíme do pracovní polohy v blízkosti detektoru.

V čase vymezeném pro praktikum (cca 3 hod. čistého času) je žádoucí provést aspoň 5 nezávislých měření, doporučená doba každého je 1000s. Dobu nabírání spektra nastavíme předvolbou.

Důležité:

Každé nabrané spektrum uložte po skončení měření **okamžitě** (před jakoukoliv jinou operací) na diskovou jednotku počítače, aby nedošlo k jeho náhodné ztrátě. Každé spektrum označte jako samostatný soubor **vlastním příjmením** a pořadovým číslem měření (např. Novák1, Novák 2, ..., Novák 5). Spektra zůstanou v počítači až do odevzdání referátu, takže je možno se k jeho zpracování vrátit po domluvě s dozírajícím pracovníkem i mimo dobu vymezenou pro praktikum.

##### 3. Zpracování spekter

Při zpracování každého spektra jako první krok označte ROI pro všechny píky, jejichž energie a plochu chcete určit (zahrňte všechny pozorované píky). Spektra s vyznačenými píky vytiskněte na připojené tiskárně. V pravé horní části je uveden čas *posledního spuštění* nabírání spektra, který je nezbytný pro určení intervalů mezi jednotlivými měřeními, potřebných při výpočtu poločasu rozpadu obou radionuklidů. Vlastní zpracování spektra provede počítač – instrukce „Peak Report“. Výsledky zpracování opět vytiskněte. Tento získaný experimentální materiál je podkladem pro řešení konkrétních fyzikálních úkolů.

## V. Fyzikální interpretace experimentálních výsledků

Oba radionuklidy ve vzorku vznikají zachytem neutronů na terčikových jádrem  $X_0$ . Mohou tedy vykazovat přebytek neutronů oproti stabilním nuklidům a lze proto očekávat, že budou převážně  $\beta$ -radioaktivní. S použitím tohoto předpokladu proveďte na základě získaného experimentálního materiálu následné analýzy:

1. Určete poločas rozpadu  $T_{1/2}$  pro jednotlivé přechody
2. Přiřaďte jednotlivé přechody, především intenzivnější, zatím blíže nespecikovaným radionuklidům a určete neznámý nuklid.
3. Sestavte rozpadové schéma nuklidu  $^{116m}\text{In}$ .

Návod k postupu:

ad1) Protože každý z radionuklidů  $X$  se rozpadá s vlastním poločasem  $T_{1/2}$ , bude s tímto poločasem také klesat intensita (resp. četnost  $A_{(t)}$ ) odpovídajících píků v závislosti na čase. K určení času  $t$  jednotlivých měření využijte okamžiky jejich startu a jejich rozdíly. Poločas  $T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$  určíme z výsledků měření běžným způsobem na základě zákona (2) proložením přímky

$$\ln[N_{(t)} / N_{(0)}] = -\lambda t = -t / \tau \quad (3)$$

experimentální body  $(t, N_{(t)})$ . Za čas  $t = 0$  volte dobu startu 1. Získané hodnoty  $T_{1/2}$  pro jednotlivé píky uveďte do souhrnné tabulky. Jeden z pozorovaných píků je náhodný součet přechodů v obou nuklidech, jejichž energie je tak blízká, že jednotlivé píky nelze rozdělit. Identifikujte pík na základě časové změny intenzity.

ad2) Na základě poločasů rozpadu přechodů přiřaďte píky jednotlivým radionuklidům, zatím blíže nespecikovaným. Výsledek poločasů rozpadu  $T_{1/2}$  nuklidů  $X_1$  a  $X_2$  a jeho chybu určete jako střední hodnotu z poločasů pro jednotlivé přechody daného nuklidu.

ad3) Jedním z radionuklidů je nuklid  $^{116}\text{In}$ . Identifikujte druhý nuklid na základě srovnání obou spekter, poločasů rozpadu  $T_{1/2}$  a předpokladu, že nuklid je  $\beta$ -aktivní. K identifikaci využijte přiloženého souboru osmi různých schémat rozpadu, který schéma hledaného nuklidu obsahuje. Do zprávy uveďte argumenty pro přiřazení naměřeného spektra tomuto nuklidu i argumenty proč schémata rozpadu odmítáte.

Výsledky měření všech spekter (energie a plochy píků) a informace z bodů 1. až 3. uveďte v souhrnné tabulce. Kromě poločasů rozpadu  $T_{1/2}$  a přiřazení nuklidů pro jednotlivé píky, uveďte také střední energie přechodů, počítané jako průměr ze všech měření.

ad4) Při radiačním zachytu neutronů nuklidem  $^{115}\text{In}$  vzniká radionuklid  $^{116m}\text{In}$  v základním stavu (spin a parita  $I_0^\pi = 1^+$ ), jednak jeho izomer  $^{116}\text{In}$  v metastabilním stavu s excitační energií 127 keV a  $I_m^\pi = 5^+$ . Oba izomery přecházejí  $\beta$ -rozpadem na jádro  $^{116}\text{Sn}$ , přitom  $\beta$ -rozpadu pro základní stav  $^{116}\text{In}$  je  $Q_\beta = 3273$  keV. Základní stav  $^{116}\text{In}$  se však rozpadá velmi rychle ( $T_{1/2} = 14$  s) prakticky pouze do základního stavu jádra  $^{116}\text{Sn}$ . Při studiu rozpadu izomerního stavu  $^{116m}\text{In}$  však byl zjištěn intenzivní  $\beta$ -rozpad s maximálními energiemi elektronů  $(E_c)_{\max} = 1009, 871, 599$  a 354 keV do vzbuzených stavů jádra  $^{116}\text{Sn}$ . Využijte těchto informací o  $\beta$ -rozpadu nuklidu  $^{116m}\text{In}$  a naměřeného spektra  $\gamma$ -záření jádra  $^{116}\text{Sn}$  k sestavení celého rozpadového schématu radionuklidu  $^{116}\text{In}$  (tj. schématu hladin s uvedením excitačních energií a se zařazenými  $\beta$ - a  $\gamma$ -přechody). Jako vzor uspořádání využijte přiložený soubor schémat. Pokuste se na základě výběrových pravidel pro  $\beta$ - a  $\gamma$ -rozpad [1], [2] určit (nebo aspoň

vymezit ) spin a paritu jádra  $^{116}\text{Sn}$ . Využijte přitom předpokladu, že pozorované  $\gamma$ - přechody jsou pouze dipólové a kvadrupólového typu. Získané výsledky zahrňte do rozpadového schématu.

#### **Literatura:**

1. K.N.Muchin: Fyzika atomnogo jadra
2. Mayer – Kukuck: Jaderná fyzika

# 170104A 11

