

## Měření $\beta$ spektra polovodičovým detektorem.

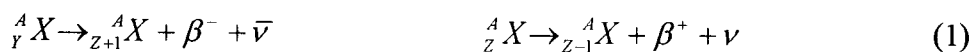
2002.03.26  
Ing. Vít Vorobel

### Úkol

1. Změřte  $\beta$  spektrum radioizotopu  $^{137}\text{Cs}$ .
2. Sestrojte Fermiho graf.
3. Určete maximální a střední energii záření  $\beta$ .
4. Pro kalibrační energii odhadněte ztráty energie elektronů
  - a) v polyetylenové fólii – výpočtem a měřením
  - b) ve vzduchu – výpočtem a měřením
  - c) v mrtvých vrstvách detektoru - výpočtem

### Teoretický úvod

Rozpad  $\beta$  je proces přeměny atomového jádra na atomové jádro o stejném počtu nukleonů lišící se však počtem protonů a neutronů o jedničku. Při této přeměně jsou vysílány částice  $\beta^-$  (elektrony) resp. částice  $\beta^+$  (pozitrony) a antineutrino resp. neutrino.



Na rozdíl od rozpadů alfa či gama je spektrum energií vylétujících částic při rozpadech  $\beta$  spojité, přestože jde o přechod mezi stavy, které mají pevně definovanou energii. To je způsobeno tím, že kromě částic  $\beta$  jsou emitovány i původně hypotetické částice neutrino a antineutrino, postulovaná v roce 1930 W. Paulim. Energie přechodu se rozdělí mezi emitované částice  $\beta$  a  $\bar{\nu}$ .

$$E_\beta + E_{\bar{\nu}} = E_0 \qquad (2)$$

Kde  $E_0$  je energie rozpadu a současně maximální energie částice  $\beta$ .

Zavedeme veličiny:

$$\varepsilon = \frac{E_\beta}{mc^2} \qquad \varepsilon_0 = \frac{E_0}{mc^2} \qquad (3)$$

kde  $mc^2$  je klidová energie elektronu.

Teorie rozpadu  $\beta$  popisuje tvar spektra emitovaných částic  $\beta$  vztahem:

$$N = (\varepsilon_0 - \varepsilon)^2 \cdot \varepsilon \cdot F_c \cdot \sqrt{\varepsilon^2 - 1} \qquad (4)$$

kde  $N$  je četnost emitovaných částic  $\beta$  s energií  $E_e$  a  $F_c$  je tzv. Fermiho funkce (pomocí které započítáváme coulombickou interakci mezi jádrem a částicí  $\beta$ ). Rovnost (4) můžeme přepsat do tvaru

$$\varepsilon_0 - \varepsilon = \sqrt{\frac{N}{F_c \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\varepsilon^2 - 1}}} \quad (5)$$

Vynesením závislosti  $\left[ N / (F_c \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\varepsilon^2 - 1}) \right]^{1/2}$  na  $\varepsilon$  dostaneme tzv. Fermiův graf spektra  $\beta$ . Pro analýzu spekter  $\beta$  je Fermiův graf užitečný, neboť umožňuje přesně určit maximální energii  $E_0$ . Podle rovnice (5) tento graf představuje přímku, která protíná osu  $\varepsilon$  v bodě  $\varepsilon_0$ .

Po rozpadu  $\beta$  se dceřinné jádro většinou nachází ve vzbuzeném (excitovaném) stavu a je deexcitováno buď vyzářením kvanta gama o energii  $E_\gamma$  nebo tzv. vnitřní konverzí, kdy jádro předá excitační energii přímo elektronu atomového obalu, který je pak emitován. Kinetická energie emitovaného (tzv. konverzního) elektronu  $E_e$  se rovná rozdílu excitační energie jádra  $E_\gamma$  a vazbové energie uvažovaného elektronu slupky  $B_e$ .

$$E_e = E_\gamma - B_e \quad (6)$$

Hovoříme o konverzi K, konverzi L atd. podle toho, ze které slupky elektronového obalu atomu dojde k emisi. Pozorujeme tedy čárové spektrum elektronů. Výsledné spektrum elektronů emitovaných radioaktivním vzorkem je potom superpozicí spojitého spektra částic  $\beta$  a čárového spektra konverzních elektronů. Tyto informace je možno použít pro kalibraci.

Při měření spekter elektronů je nutno mít na paměti, že emitované elektrony před vniknutím do citlivé oblasti detektoru ztrácejí energii interakcí s prostředími, kterými procházejí. Naměřená energie je tedy menší než energie emitovaného elektronu. Elektrony a pozitrony při průchodu látkou ztrácejí svoji kinetickou energii hlavně dvěma pochody:

- a) ionizací a excitací atomů látky
- b) buzením brzdného záření.

### **Postup měření**

Při vlastním měření se používá  $\beta$  zářič  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30.17$  let). Tento izotop se rozpadá  $\beta$  rozpadem, vyzářením elektronu, na stabilní izotop  $^{137}\text{Ba}$  ve vzbuzeném stavu 661.7 keV (97% rozpadů). Tento vzbuzený stav se potom deexcituje přímo vyzářením gama kvanta nebo vnitřní konverzí na slupce K atomového obalu jádra. Vazbová energie K obalového elektronu je 37.7 keV, energie konverzních elektronů bude 624 keV.

ad 1. Proved'te lineární kalibraci spektrometru použitím konverzního píku. Předpokládejte, že nulovému kanálu odpovídá nulová energie. pro oddělení spektra  $\beta$  od spektra  $\gamma$ , proved'te jedno měření ve vakuované aparatuře, při druhém měření použijte destičku na odstínění částic  $\beta$ . Odečtením těchto dvou spekter pak získáte spektrum pouze od elektronů.

ad 2. Z čistého spektra  $\beta$  sestrojte podle (5) Fermiův graf. Pro Fermiho funkci použijte tabelované hodnoty nebo přibližnou závislost (viz dodatek).

ad 3. Naměřeným spektrem proložte teoretickou závislost a určete maximální a střední hodnotu energie elektronů.

ad 4. Měřením polohy konverzního píku při natočení vzorku o  $0^\circ$  a  $45^\circ$  odhadněte ztráty energie při průchodu polyetylenovou fólií.

Předpokládejte bodový zářič umístěný mezi dvěma polyetylenovými fóliemi (viz dodatek) a přímkou trajektorii elektronu ve folii.

Ztráty ve vzduchu určete ze změny polohy píku, porovnáním spektra naměřeného ve vakuované aparatuře a ve vzduchu.

Ztráty v prostředích, kterými emitované elektrony procházejí odhadněte pomocí Bethe-Blochovy formule (viz dodatek). Radiační ztráty zanedbejte.

Srovnajte naměřené hodnoty ztrát s teoretickými.

### Aparatura a pomůcky

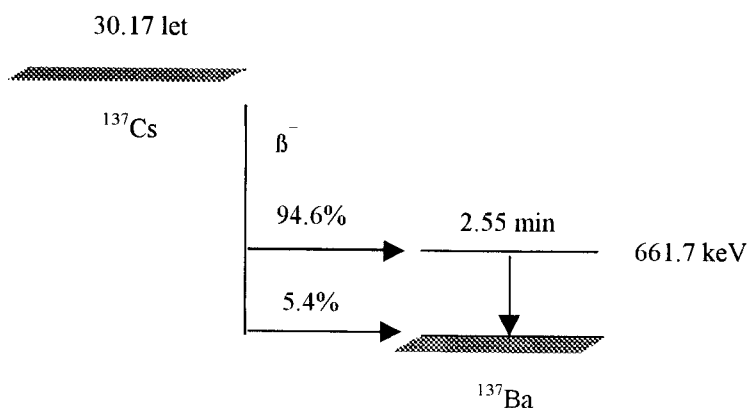
1. Měřicí aparatura RTF 20046 s jednocanálovým amplitudovým analyzátozem.
2. Si detektor s předzesilovačem.
3. Vakuová aparatura.
4. Zářič  $^{137}\text{Cs}$ .
5. Pinseta

### Literatura

1. F.Štěrbá, M.Suk, Z.Trka: Atomová a jaderná fyzika; str.130
2. I.Úlehla, M.Suk, Z.Trka: Atomy, jádra, částice; str.242
3. T.Mayer-Kuckuk: Fyzika atomového jádra; str.272
4. J.Beneš: Diplomová práce; KJF MFF UK Praha 1988
5. K.Rektorys a kol.: Přehled užití matematiky. Metoda nejmenších čtverců; str.1057

### Dodatek

#### Rozpadové schéma $^{137}\text{Cs}$



Fermiho funkce  $F_c$ :

$E_{\text{kin}}(\text{keV})$	50	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
$F_c$	15,8	14,6	12,9	11,7	10,9	10,2	9,7	9,3	9,0	8,7	8,4	8,2	8,0

$E_{\text{kin}}(\text{keV})$	300	320	340	360	380	400	450	500	550	600
$F_c$	7,9	7,7	7,6	7,5	7,4	7,3	7,0	6,8	6,7	6,6

$$F_c(Z, \varepsilon) = 2\pi n [1 - \exp(-2n)]^{-1} \quad (7)$$

kde  $n$  je  $\alpha Z / \beta$ ,  $\alpha = 1/137$  je konstanta jemné struktury,  $Z$  je protonové číslo,  $\beta = v/c$  a  $v$  je rychlost elektronu.

Ionizační a excitační ztráty částic  $\beta$  můžeme vypočítat pomocí Bethe-Blochovy formule:

$$-\frac{dT}{dx} = A \left[ \ln B - \left( 2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2 \right) \ln 2 + (1-\beta^2) + \frac{1}{8} (1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \quad (8)$$

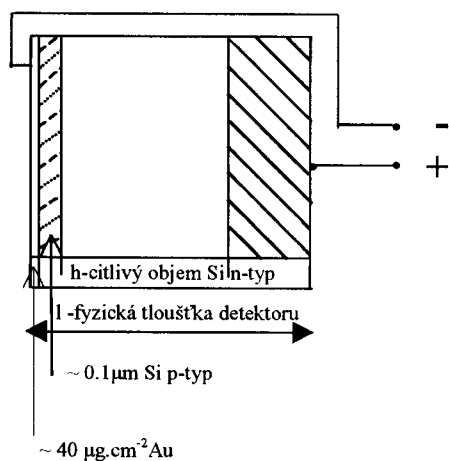
kde

$$A = \left( \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \right)^2 \left( \frac{2\pi e^4 n_e}{m_e v^2} \right) \quad (9)$$

$$B = \frac{m_e v^2 T}{2I^2 (1-\beta^2)} \quad (10)$$

$m_e$  je hmotnost elektronu ( $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg),  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C,  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12}$  F · m<sup>-1</sup>),  $n_e$  je počet elektronů v objemové jednotce,  $v$  je rychlost elektronu,  $T$  je jeho kinetická energie a  $I$  je tzv. střední budící potenciál látky. Počítá se podle přibližného empirického vztahu  $I = 13,5Z$ , kde  $Z$  je protonové číslo (hodnoty  $I$  vycházejí v eV).  $\beta = v/c$

Průřez detektorem



Průřez radioaktivním zdrojem

