

A0. Studium spekter γ záření polovodičovým spektrometrem

Pracovní úkol:

Cílem studované úlohy je seznámit posluchače s vlastnostmi spekter gama záření získaných polovodičovým spektrometrem. Měření se provádí na spektrometru KJF s GeLi detektorem o objemu aktivní oblasti 55 cm^3 (průměr čela detektoru je 70 mm). Měření je prováděno se zářiči s jednoduchým spektrem gama záření: ^{137}Cs ($E = 661,66 \text{ keV}$) a ^{24}Na ($E = 1368,63$ a $2754,03 \text{ keV}$), které jsou současně používány ke kalibraci spektrometru.

Teorie:

Při detekci γ záření v polovodičovém spektrometru dochází k několika různým jevům, které mají specifickou odezvu v naměřeném spektru.

- Fotoefekt** - V tomto případě způsobí foton ionizaci atomu detektoru. Ionizovaný atom se většinou opět velmi rychle deexcituje, takže ve výsledku bude vytvořen puls odpovídající energii původního fotonu. Ve spektru je tato oblast označována jako FEP (*full energy peak*).
- Comptonův rozptyl** - Foton se může na volných elektronech také pouze rozptýlit. Odražený elektron tudíž nezíská celou energii fotonu, ale pouze její část. Podle zákonů zachování hybnosti a energie vychází, že maximální energie předaná elektronu (při zpětném rozptylu) je

$$(T_C)_{\max} = \frac{2E_0^2}{E_{e0} + 2E_0} \quad (1)$$

kde E_0 je původní energie fotonu a E_{e0} klidová energie elektronu. Foton se může rozptýlit do libovolného úhlu, takže výsledné spektrum bude spojitě, ovšem bude končit v místě odpovídajícím maximální energii (1) – tzv. Comptonovská hrana

- Dvojnásobný Comptonův rozptyl** - Pokud se foton rozptýlí dvakrát, přispějí oba vzniklé elektrony k pulsu na detektoru společně. V tomto případě vzniká opět spojitě spektrum s maximem energie

$$(T_{C2})_{\max} = \frac{4E_0^2}{E_{e0} + 4E_0} \quad (2)$$

- Tvorba elektron-pozitronových párů** - Dostatečně energetický foton se v oblasti detektoru rozpadne na elektron a pozitron. Vzniklé částice neopustí aktivní oblast, takže svojí kinetickou energii ($E_0 - 2E_{e0}$) vždy předají detektoru. Pozitron navíc anihiluje a vytvoří dvě γ kvanta, každé o energii E_{e0} . Tyto fotony mohou být buď pohlceny oba, nebo může jeden (i oba) uniknout. Z toho plyne, že detektor může zaregistrovat tři různé hodnoty energie. V případě pohlcení obou fotonů je to energie E_0 , tedy jako v případě fotoefektu. V případě úniku jednoho fotonu pozorujeme SEP (*single escape peak*) s energií ($E_0 - E_{e0}$). V případě úniku obou fotonů odpovídá puls energii ($E_0 - 2E_{e0}$) - DEP (*double escape peak*).
- Tvorba párů mimo detektor** - V tomto případě je podstatné to, že vzniklý pozitron anihiluje a produkuje dvě γ kvanta o energii E_{e0} , které se budou pohybovat navzájem opačnými směry. Lze tudíž pozorovat dopad jen jednoho z nich - tzv. anihilační peak.
- Comptonův rozptyl mimo detektor** - Foton se může comptonovsky rozptýlit i mimo detektor a tudíž do něj vstupuje s menší energií. Nejmenší energie, kterou může takto rozptýlený elektron mít je

$$E_{\min} = \frac{E_{e0}E_0}{E_{e0} + 2E_0} \quad (3)$$

Kvůli geometrii detektoru převládají rozptyly na velké úhly, takže bude možné v místě energie E_{\min} pozorovat poměrně ostrou vzestupnou hranu a dále pak pozvolnější pokles (tzv. hrana zpětného rozptylu).

Ve výstupech ovládacího programu je ke každému na peaku uvedena i jeho pološířka (tedy šířka nafitovaného normálního rozdělení ve výšce poloviny maxima). Jednoduchým dosazením do normálního rozdělení vychází

$$\sigma = \frac{FWHM}{\sqrt{8 \ln 2}} \quad (4)$$

kde FWHM je udávaná pološířka a σ budu brát jako odhad chyby polohy peaku.

Pokud budu chtít ze známé polohy comptonovské hrany nebo hrany zpětného rozptylu určit energii původního γ záření je vhodné vzorce (1), (2) a (3) upravit do vhodnější podoby:

$$E_0 = \frac{(T_C)_{\max}}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2E_{e0}}{(T_C)_{\max}}} \right) \quad (5)$$

$$E_0 = \frac{(T_{C2})_{\max}}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{E_{e0}}{(T_C)_{\max}}} \right) \quad (6)$$

$$E_0 = \left(\frac{1}{E_{\min}} - \frac{2}{E_{e0}} \right)^{-1} \quad (7)$$

Měření:

Provedli jsme kalibraci spektrometru pomocí známého spektra radia (^{226}Ra). Použili jsme peaků (351,92; 609,32; 1120,29; 1764,50; 2204,10 keV). Další měření bylo prováděno se vzorkem cesia (^{137}Cs) a ozářené kuchyňské soli ($^{24}\text{Na} + ^{38}\text{Cl}$).

U vzorku cesia jsem získal spektrum zobrazené v grafu 1. V grafech je velmi výrazný FEP. Podle výpočtu programu a podle vztahu (4) je jeho energie ($661,60 \pm 0,64$) keV. Dále je v grafu dobře vidět hrana comptonovského rozptylu a její polohu odhaduji (478 ± 8) keV. Podle vztahu (5) mohu určit předpokládanou energii původního záření na (662 ± 10) keV. Hranu dvojnásobného comptonovského rozptylu odhaduji (551 ± 30). Ve spektru jsem ještě určil hranu zpětného odrazu (184 ± 6). Přepoččet na původní energie je v tabulce 1.

Tabl Rozbor spektra cesia

	E [keV]	σ [keV]	E_0 přepoččet [keV]	σ_{E0} [keV]
Hrana zpětného odrazu	184	6	657	69
Comptonova hrana	478	8	662	10
Druhá comptonova hrana	551	30	658	31

Spektrum získané ze vzorku soli je v grafu 2. Jedna hrana leží na energii (2610 ± 105) keV. Podle vztahu (5) ji tedy odpovídá energie původního záření (2844 ± 105) keV. Hrana druhého záření Na leží na energii (1229 ± 75) keV a původní záření by mělo mít energii (1446 ± 77) keV. Dále je ve spektru několik peaků. Přehledně je shrnuje tabulka 2.

Tab2 peaky ve spektru NaCl

č. peaku	E [keV]	Popis
1	$346,5 \pm 0,5$	DEP od peaku č.3
2	$510,8 \pm 1,2$	Anihilační peak (511 keV)
3	$1368,6 \pm 1,0$	FEP - záření Na (1368,63 keV)
4	$1460,8 \pm 1,0$	Pozadí – záření ^{40}K (1460,8 keV)
5	$1642,7 \pm 1,0$	FEP – záření Cl (1642 keV)
6	$1731,8 \pm 1,2$	DEP od peaku č.9
7	$2167,6 \pm 1,4$	FEP – záření Cl (2167 keV)
8	$2243,0 \pm 1,8$	SEP od peaku č.9
9	$2754,3 \pm 1,6$	FEP – záření Na (2753,9 keV)

Hodnoty energií v popisu v tabulce uvádím podle [1]. Peaky zpětného rozptylu by měly ležet na energiích kolem 220 keV. V těchto místech je ale naměřené spektrum už velmi silně zašumněno, takže se mi tyto peaky nepodařilo určit. podařilo

Diskuze:

Chybu určení energií peaků počítám z pološířky proloženého normálního rozdělení. Tyto chyby jsou způsobeny nejrůznějšími jevy probíhajícími v detektoru, které způsobí, že elektrony, které by teoreticky měly mít jednu přesnou energii jsou zaznamenány jako širší spektrum energií s normálním rozdělením. Tuto chybu je možné snížit pouze použitím jiného detektoru (s menším šumem apod.). Při určování energie původního záření pomocí polohy Comptonovských hran jsem chybu i polohu odhadoval z naměřeného spektra, proto se mohlo stát, že jsem chybu nadhodnotil. Mé výsledky se v rámci chyby shodují s uvedenými energiemi peaků..

Při měření spektra NaCl jsem pozoroval i peak od radioaktivního draslíku ^{40}K . Použili jsme kuchyňskou sůl kde je draslíku dostatek. Hran rozptylu odpovídají v rámci chyby peakům spektra ^{24}Na , přestože jsou velmi vzdáleny od dané energie. To bude způsobeno mým špatným odečtem hrany rozptylu. Z grafu 2 je vidět, že energie na, které leží hrana je nižší než, kterou jsem odečetl. Energie FEP se velmi dobře shodují s hodnotami podle [1]. Taktéž další naměřené peaky svou energií odpovídají procesům popsaným v teoretické části, případně energiím označeným bez popisu v grafu u úlohy. Hranu sekundárního Comptonova rozptylu ani peak zpětného odrazu se mi ve spektru nepodařilo určit.

Závěr:

Podle známého spektra záření radonu jsme zkalibroval detektor.

Naměřili jsme spektrum ^{137}Cs (viz graf 1), ve kterém je velmi výrazný peak plné energie. Jeho energie byla určena na $(661,60 \pm 0,64)$ keV. Podle hrany Comptonovského rozptylu, druhé Comptonovy hrany a hrany zpětného odrazu jsme určili původní energii viz. tabulka č.1. Všechny určené energie jsou ve velmi dobré shodě s hodnotou energie záření 661,66 keV podle [1].

Dále jsme měřili spektrum ozářeného chloridu sodného (viz graf 2). Zjistil jsem větší množství intenzivních peaků, které jsou shrnuty v tabulce 1. Peak odpovídá procesům popsaným v teoretické části. Hodnoty energií FEP se shodují s [1] a rozdíl energií FEP, SEP a DEP je v rámci chyby roven klidové energii elektronu (511 keV). Změřená energie anihilačního peaku se také rovná klidové hmotnosti elektronu. Z hran Comptonovských rozptylů jsme určili polohy dvou energií v původním γ záření jsou to (2844 ± 105) a (1446 ± 77) keV.

Literatura:

- [1] studijní text z internetových stránek Praktika IV
(http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_400.pdf)