Úloha A0 – Studium spekter γ záření polovodičovým spektrometrem

Pracovní úkol:

1. 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 keV)a ^{24}Na (E = 1368,63 a 2754,03 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.

a) **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*).

b) **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

$$(T_{\mathrm{C}})_{\max} = \frac{2E_0^2}{E_{\mathrm{e}0} + 2E_0}\,, \tag{1}$$

kde E_0 je původní energie fotonu a $E_{\mathrm{e}0}$ klidová energie elektronu.

Foton se může rozptýlit do libovolného úhlu, takže výsledné spektrum bude spojité, ovšem bude končit v místě odpovídajícím maximální energii (1).

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

$$(T_{\mathrm{C}2})_{\max} = \frac{4E_0^2}{E_{\mathrm{e}0} + 4E_0}\,, \tag{2}$$

d) **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 ($E_0 - 2E_{\mathrm{e}0}$) vždy předají detektoru. Pozitron navíc anihiluje a vytvoří dvě γ kvanta, každé o energii $E_{\mathrm{e}0}$. Tyto fotony mohou být buďto oba pohlceny, nebo mohou (jeden nebo 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 ($E_0 - E_{\mathrm{e}0}$). V případě úniku obou fotonů odpovídá puls energii ($E_0 - 2E_{\mathrm{e}0}$) – DEP (*double escape peak*).

e) **Tvorba párů mimo detektor.** V tomto případě je podstatné to, že vzniklý pozitron anihiluje a produkuje dvě γ kvanta o energii $E_{\mathrm{e}0}$, které se budou pohybovat navzájem opačnými směry. Lze tudíž pozorovat dopad jen jednoho z nich – tzv. anihilační peak.

f) **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

$$E_{\min} = \frac{E_{\mathrm{e}0}E_0}{E_{\mathrm{e}0} + 2E_0}\,. \tag{3}$$

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. *peak zpětného rozptylu*).

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

$$\sigma = \frac{\mathrm{FWHM}}{\sqrt{8\ln 2}}\,, \tag{4}$$

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

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

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

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

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

Měření: Nejprve jsme použitý detektor zkalibroval podle známého spektra radia podle peaků o energiích 351,92, 609,32, 1120,29, 1764,50 a 2204,10. Dále jsme měřil vzorky cesia (^{137}Cs) a ozářené kuchyňské soli (^{24}Na + ^{38}Cl).

U vzorku cesia jsem získal spektrum zobrazené v grafu 1 (graf 2 ukazuje detail hrany comptonovského rozptylu). V grafech je velmi výrazný FEP. Podle výpočtu programu a podle vztahu (4) je jeho energie (661 ± 2) keV.

Dále je v grafu dobře vidět hrana comptonovského rozptylu. Je dobře vidět v grafu 2 a její polohu odhaduji na (482 ± 3) keV. Podle vztahu (5) mohu určit předpokládanou energii původního záření na (663 ± 3) keV.

Hranu dvojnásobného comptonovského rozptylu se mi určit nepodařilo. Ve spektru jsem ještě určil peak zpětného odrazu. Odečtená energie patřící k dolní hraně zpětného odrazu je (190 ± 3) keV. Podle vztahu (7) vychází energie nerozptýleného záření (740 ± 50) keV.

Spektrum získané ze vzorku soli je v grafu 3 (v grafech 4 a 5 pak detaily jednotlivých hran comptonovských rozptylů). Jedna hrana (viz graf 4) leží na energii (2524 ± 4) keV. Podle vztahu (5) ji tedy odpovídá energie původního záření (2758 ± 4) keV.

Druhá hrana comptonovského rozptylu je v grafu 4. Leží na energii (1154 ± 4) keV a původní záření by tudíž mělo mít energii (1369 ± 4) keV.

Dále je ve spektru několik peaků. Přehledně je shrnuje tabulka 1.

č.	E [keV]	Popis
1.	2754 ± 2	FEP – záření Na (2754,03 keV)
2.	2615 ± 2	pozadí – záření Th (2614,6 keV)
3.	2244 ± 2	SEP od peaku 1
4.	2168 ± 2	FEP
5.	1733 ± 2	DEP od peaku 1
6.	1643 ± 2	FEP
7.	1461 ± 2	pozadí – záření ^{40}K (1460,8 keV)
8.	1369 ± 2	FEP – záření Na (1368,63 keV)
9.	609 ± 2	pozadí – radon (609,3 keV)
10.	511 ± 2	anihilační peak (511,00 keV)
11.	348 ± 2	DEP od peaku 8 (*tento peak nebyl programem nalezen*)

Tabulka 1 – peaky ve spektru NaCl

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.

Diskuze: Chyby přímého určení energií peaků počítám podle tvaru proložené křivky 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.).

Chyba určení energie původního záření pomocí polohy comptonovských hran jsou dány hlavně tím, že hledaná hrana není z principu naprosto ostrá a plynule přechází do šumu detekovaného na pozadí. Za předpokladu znalosti účinného průřezu pro různé úhly rozptylu by bylo možné tuto funkci proložit naměřenými daty a tak mnohem lépe určit energii odpovídající rozptylu na 180°.

Určení energie peaku plné energie i výpočet podle hrany comptonovského rozptylu vychází správně. Hodnota původní energie určená podle peaku zpětného odrazu se ani v rámci chyby neshoduje. Vychází o něco vyšší, takže předpokládám, že z nějakého důvodu dochází k rozptylu pouze na úhly menší než θ, kde $\theta < 180°$. To je pravděpodobně způsobeno tím, že fotony, které by se mohly rozptýlit zpět jsou již předtím z velké části pohlceny v detektoru.

V případě měření spektra NaCl byly intenzity zářičů mnohem menší, takže je možné pozorovat i peaky od radioaktivních prvků na pozadí. Podle hran rozptylu vychází v rámci chyby energie dvou peaků spektra ^{24}Na. 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 bližšího popisu v grafu u úlohy. V tabulce 1 jsou to řádky s popisem pouze „FEP“. Předpokládám, že jde o záření chloru, ke kterému ale neznám tabulkové hodnoty energií.

Hranu sekundárního Comptonova rozptylu ani peak zpětného odrazu se mi ve spektru nepodařilo určit.

ZÁVĚR: Podle známého spektra záření radonu jsme zkalibroval detektor.

Naměřil jsme spektrum ^{137}Cs (viz grafy 1 a 2), ve kterém je velmi výrazný peak plné energie. Podle jeho polohy byla určena energie (661 ± 2) keV. Podle hrany comptonovského rozptylu jsme určil původní energii záření na (663 ± 3) keV. Dále jsme se pokusil určit energii původního záření podle peaku zpětného odrazu. Získal jsme ovšem hodnotu, kterou není možné správně interpretovat (pravděpodobně kvůli geometrii detektoru).

Metoda přímého měření FEP i zjištění comptonovské hrany dávají dobré výsledky, které jsou ve velmi dobré shodě s hodnotou energie záření 661,66 keV podle [1].

Dále jsme měřil spektrum ozářeného chloridu sodného (viz grafy 3 až 5). Zjistil jsme větší množství méně intenzivních peaků, které jsou shrnuty v tabulce 1. Některé peaky jsem pomocí hodnot z [1] identifikoval jako pozadí, ostatní odpovídají 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 určil polohy dvou energií v původním záření – jsou to (2758 ± 4) a (1369 ± 4) keV. Tyto hodnoty v rámci chyby odpovídají údajům z [1].

LITERATURA:

[1] text k úloze A0