

Úkol

1. Proveďte kalibraci spektrometru pomocí preparátu obsahujícího ^{226}Ra (hodinky).
2. Změřte spektrum γ -záření z ^{137}Cs . Z aparaturního spektra určete:
 - energii γ -záření (FEP),
 - polohu comptonovy hrany,
 - hraniční energii dvojného comptonova rozptylu,
 - polohu píku zpětného rozptylu,
 - energii/e γ -záření přirozeného pozadí a identifikujte zdroj/e.
3. Změřte spektrum γ -záření z ^{24}Na . Z aparaturního spektra určete:
 - energie γ -záření (FEP1, FEP2),
 - polohy comptonových hran příslušných k oběma FEP,
 - polohu píku zpětného rozptylu (společný oběma FEP),
 - polohy viditelných únikových píků (SEP2, DEP2, případně DEP1),
 - polohu anihilačního píku.
4. Vysvětlete mechanismy vzniku pozorovaných objektů v aparaturních spektrech.
5. Porovnejte změřené polohy všech pozorovaných objektů ve spektrech s tabulkovými nebo teoretickými hodnotami.

Teorie

S aktivní oblastí polovodičového detektoru interagují dopadající ionizující částice, v tomto případě částice γ . Touto interakcí vznikají volné elektrony, které jsou následně vnějším polem unášeny na elektrodu, kde se registrují.

Jedním z mechanismů vzniku volných elektronů je fotoefekt, při kterém dochází k předání energie fotonu na elektron. Tento elektron je uvolněn z atomového obalu s energií fotonu zmenšenou o ionizační energii potřebnou k uvolnění z obalu. Ionizační energie je však v našem případě výrazně menší než energie fotonu, proto je energie takto vzniklého volného elektronu úměrná energii fotonu. Tyto elektrony přispívají k píku FEP (Full Energy Peak).

Dalším jevem je rozptyl fotonů na volných elektronech, tzv. Comptonův efekt. Energie předaná elektronu závisí na úhlu rozptylu, její průběh je však spojitý, proto se dá dobře rozlišit jen její extrémní hodnota, vznikající při úhlu rozptylu π . Tehdy předá foton elektronu maximum energie. To ve spektru vytvoří tzv. comptonovu hranu.

Pro výpočet polohy comptonovy hrany lze použít vzorec

$$E_{\text{CH}} = \frac{2E_{\text{FEP}}^2}{m_e + 2E_{\text{FEP}}}, \quad (1)$$

kde $m_e = 511 \text{ keV}$ je klidová energie elektronu.

Ekvivalentní vzorec platí také pro výpočet polohy hrany dvojného comptonova rozptylu

$$E_{\text{DCR}} = \frac{4E_{\text{FEP}}^2}{m_e + 4E_{\text{FEP}}}. \quad (2)$$

Mechanismus vzniku této hrany je stejný jako výše, avšak foton se comptonovsky rozptýlí dvakrát.

Je-li energie fotonu vyšší než $2m_e$, může se foton přeměnit na pár elektron-pozitron. Pozitron velmi rychle anihiluje a vyzařuje dva fotony s energií blízkou m_e . Tyto fotony poté mohou být opět absorbovány a tím přispívají k píku FEP, nebo může jeden či oba uniknout z oblasti detektoru. V případě úniku jednoho fotonu vzniká jedno-únikový pík SEP (Single Escape Peak), v případě úniku obou fotonů vzniká dvou-únikový pík DEP (Double Escape Peak).

Fotony také mohou interagovat mimo detektor. Do detektoru se dostávají fotony comptonovsky rozptýlené mimo detektor a vytvářejí široký pík zpětného rozptylu. Také tvorba elektron-pozitronového páru a následná anihilace může proběhnout mimo detektor, dostane-li se poté do detektoru jeden z vyzářených fotonů, přispívá svou energií blízkou m_e k anihilačnímu píku.

Energetické píky jsou charakterizovány svojí polohou E , svojí šířkou v polovině maxima FWHM a hodnotou *Net Area* N . Údaj FWHM je s chybou určení polohy píku σ_E spojen vztahem

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_E. \quad (3)$$

Výsledky

Úkol 1

Pomocí spektra preparátu ^{226}Ra a softwaru v praxi byla provedena kalibrace měření, tedy přiřazení odpovídajících hodnot energií kanálům. Kalibrační křivka je kvadratická s předpisem $E = A + Bk + Ck^2$, kde k je číslo kanálu. Koeficienty jsou

$$A = -4,955\,430 \times 10^{-2} \text{ keV},$$

$$B = 4,477\,776 \times 10^{-1} \text{ keV},$$

$$C = 2,606\,223 \times 10^{-8} \text{ keV}.$$

Protože konstanta C je řádově menší než ostatní, je v intervalu, který nás zajímá, kalibrace v podstatě lineární. Při zpracování dat byla však použita nepřiblížená kvadratická kalibrace. Použité spektrum je zobrazeno v přiloženém grafu nahoře.

Úkol 2

V tabulce 1 jsou uvedeny informace o pících ^{137}Cs . Chyba polohy píku σ_E byla spočtena podle (3). Níže jsou pak uvedeny odečtené energie comptonovské hrany, hrany dvojného comptonova rozptylu a píku zpětného rozptylu. Chyby těchto hodnot byly určeny odhadem. Popsané spektrum je zobrazeno v grafu v příloze.

E [keV]	FWHM [keV]	σ_E [keV]	N []	σ_N []	Popis	V grafu
661,66	1,87	0,79	35 184	200	Absorpční pík	FEP
1460,78	1,95	0,83	386	23	Pozadí, ^{40}K	K
609,37	1,62	0,69	407	80	Pozadí, ^{226}Ra	Ra
1120,19	2,37	1,01	354	45	Pozadí, ^{226}Ra	Ra
1764,55	2,26	0,96	338	26	Pozadí, ^{226}Ra	Ra
2204,35	2,66	1,13	114	15	Pozadí, ^{226}Ra	Ra

Tabulka 1: Informace o pících ^{137}Cs

$$E_{\text{CH}} = (478 \pm 5) \text{ keV}$$

$$E_{\text{DCR}} = (563 \pm 18) \text{ keV}$$

$$E_{\text{ZR}} = (186 \pm 3) \text{ keV}$$

Podle vztahu (1) spočteme teoretickou polohu comptonovy hrany

$$E_{\text{CH, teorie}} = (477,34 \pm 0,73) \text{ keV}$$

a podle (2) polohu dvojného comptonova rozptylu

$$E_{\text{DCR, teorie}} = (554,58 \pm 0,77) \text{ keV}.$$

Úkol 3

V tomto úkolu bylo měřeno spektrum γ záření NaCl. Protože však chlor do spektra příliš nepřispívá, ve zbytku protokolu mluvíme o tomto měření jako o měření spektra ^{24}Na . V tabulce 2 jsou uvedeny informace o pících, níže opět energie hran a zpětného píku. Chyby byly určeny jako výše. Popsané spektrum je zobrazeno v grafu v příloze.

E [keV]	FWHM [keV]	σ_E [keV]	N []	σ_N []	Popis	V grafu
2754,36	2,59	1,10	5220	74	Absorpční pík	FEP1
2243,13	2,44	1,04	1019	45	Jedno-únikový pík	SEP1
1732,12	2,22	0,94	1914	52	Dvou-únikový pík	DEP1
1368,70	2,02	0,86	11 435	114	Absorpční pík	FEP2
511,00	2,02	0,86	332	46	Anihilační pík	ANI

Tabulka 2: Informace o pících ^{24}Na

$$E_{\text{CH1}} = (2520 \pm 8) \text{ keV}$$

$$E_{\text{CH2}} = (1150 \pm 10) \text{ keV}$$

$$E_{\text{ZR}} = (240 \pm 6) \text{ keV}$$

Podle vztahu (1) spočteme teoretickou polohu comptonovy hrany

$$E_{\text{CH1, teorie}} = (2520,55 \pm 1,09) \text{ keV},$$

$$E_{\text{CH2, teorie}} = (1153,39 \pm 0,84) \text{ keV}.$$

Úkol 4 a 5

Náplň těchto úkolů byla provedena v sekci teorie, úkolu 2 a 3 a diskuse.

Diskuse

Tabulková hodnota píku ^{137}Cs je 661,657 keV, hodnoty píků ^{24}Na jsou 2754,028 keV a 1368,633 keV [2]. Naměřené polohy píků se s těmito hodnotami v rámci chyby shodují. Comptonovské hrany se shodují s vypočtenými hodnotami. Hrana dvojného rozptylu ^{137}Cs má větší odhad chyby, protože tato hrana je ve spektru velmi špatně definovaná.

^{40}K má pík v poloze 1460,830 keV [2], což potvrzuje náš odhad v úkolu 2. Správnost určení ostatních píků jako produkty ^{226}Ra lze snadno ověřit srovnáním hodnot s referenčními hodnotami použitými pro kalibraci, popsané v grafu v příloze nahoře. Píky SEP1 a DEP1 mají energii (v rámci chyby) o m_e , resp. $2m_e$ nižší než pík FEP1, což souhlasí s teorií. Taktéž anihilační pík má polohu blízkou energii m_e .

Závěr

Byla provedena kalibrace spektrometru pomocí preparátu obsahujícího ^{226}Ra . Byla použita nepřiblížená kvadratická kalibrace.

Bylo změřeno spektrum γ -záření z ^{137}Cs . Byly určeny polohy zajímavých hran a píků. Tyto polohy odpovídají teoretickým předpovědím. Totéž bylo provedeno pro ^{24}Na . Byly vysvětleny mechanismy vzniku těchto hran a píků.

Reference

- [1] Pokyny k měření “Studium spekter γ -záření polovodičovým spektrometrem”, dostupné z https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_400.pdf, 7. 11. 2018
- [2] The Lund/LBNL Nuclear Data Search, dostupné z <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/>, 7. 11. 2018