

6.2 Měření účinného průřezu pro fotoefekt a Comptonův rozptyl

V úloze je měřena radiace z radioaktivních zdrojů, přesněji zdrojů záření gama – cesia ^{37}Cs a sodíku ^{22}Na scintilačním detektorem a energetické spektrum analyzátozem výšky pulsů. Části spektra odpovídající Comptonovu jevu a foto-efektu jsou odhadnuty na základě velikosti odpovídajících ploch ve spektru. Výsledkem je určení poměru efektivních účinných průřezů a vysledování závislosti účinných průřezů výše uvedených jevů na energii dopadajícího gama záření.

Princip měření

Detekce fotonů je založena na interakci mezi elektromagnetickým zářením, tedy gama zářením, a elektrony v materiálu scintilátoru. Nejvýznamnějšími procesy, které probíhají pod vlivem elektromagnetické interakce, jsou fotoelektrický jev, Comptonův efekt a tvorba párů elektron a pozitron. Pro každý tento proces je typický účinný průřez (tedy pravděpodobnost daného procesu), který pak determinuje tvar (výšku a plochu) signálu ve spektru daného zářiče, neboť pravděpodobnost těchto jevů se výrazně mění s energií vstupujícího gama záření. Pro tvorbu párů je zapotřebí, aby elektron měl minimálně energii 1 022 keV, což odpovídá dvojnásobku klidové energie elektronu. Tento proces může být proto pro nižší vstupní energie gama záření zanedbán.

V případě fotoelektrického jevu elektromagnetické pole gama záření interaguje s elektronem a v souladu se zákony kvantové mechaniky gama záření může předat veškerou svou energii elektronu, který je pak vyzářen z atomového obalu. Fotoelektrony odpovídající maximální předané energii gama kvanta jsou ve spektru prezentovány ostře definovanou hranicí, tzv. Comptonovou hranou. Signál odpovídající fotoefektu má přibližně Gaussovský charakter (viz obr. 6.3), takže plocha signálu A_F může být určena z výšky signálu a a šířky signálu v polovině maxima b následujícím vztahem

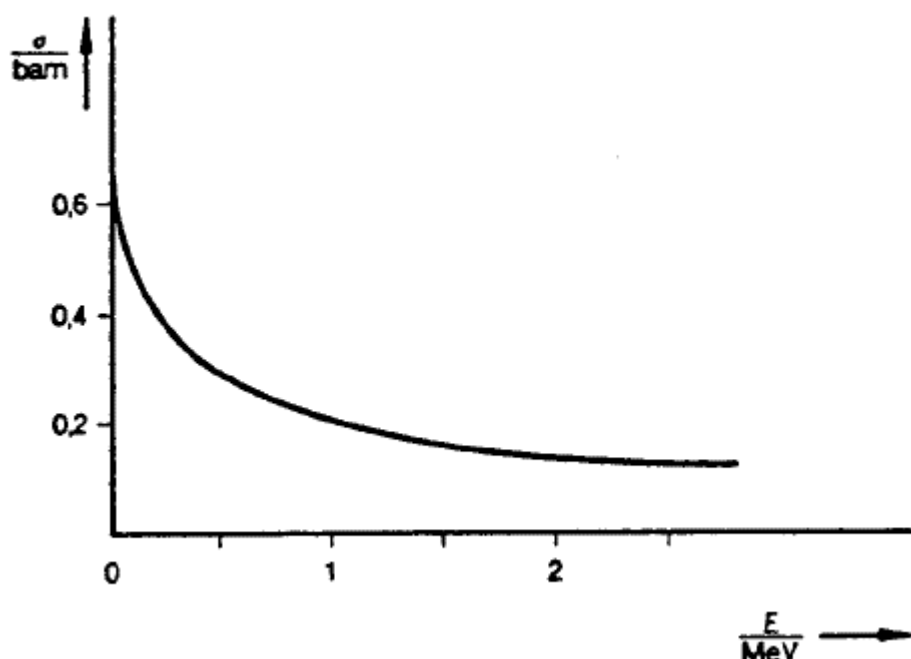
$$A_F = a \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sqrt{\ln 2} .$$

Comptonův jev ukazuje částicový charakter gama záření, neboť zde dochází k rozptylu gama záření na elektronech. Vztah pro efektivní účinný průřez Comptonova jevu je konzistentně odvozen jen pomocí kvantové elektrodynamiky a popisuje jej tzv. Klein-Nishinova formule, kterou zde neuvádíme, ale grafickou závislost Comptonova účinného průřezu na energii lze sledovat na obr. 6.3.

Část gama záření odraženého Comptonovým rozptylem je reprezentována kontinuálním plátó ve spektru gama zářiče, které se rozprostírá od nulové energie až k výrazné hraně spadající k minimu. Tato hrana se nazývá Comptonova a odpovídá gama kvantu rozptýlenému o 180° a gama záření získává maximální energii. Změna energie gama záření po Comptonově rozptylu je popsána vztahem

$$\Delta E = \frac{E \cdot 2 \cdot \Lambda \cdot \sin^2 \frac{\Phi}{2}}{2 \cdot \Lambda \cdot \sin^2 \frac{\Phi}{2} + \frac{h \cdot c}{E}}$$

Λ je Comptonova vlnová délka elektronu $\Lambda = \frac{h}{m_e \cdot c}$ a Φ je úhel, pod kterým je gama záření rozptýleno a E je energie původního gama záření.

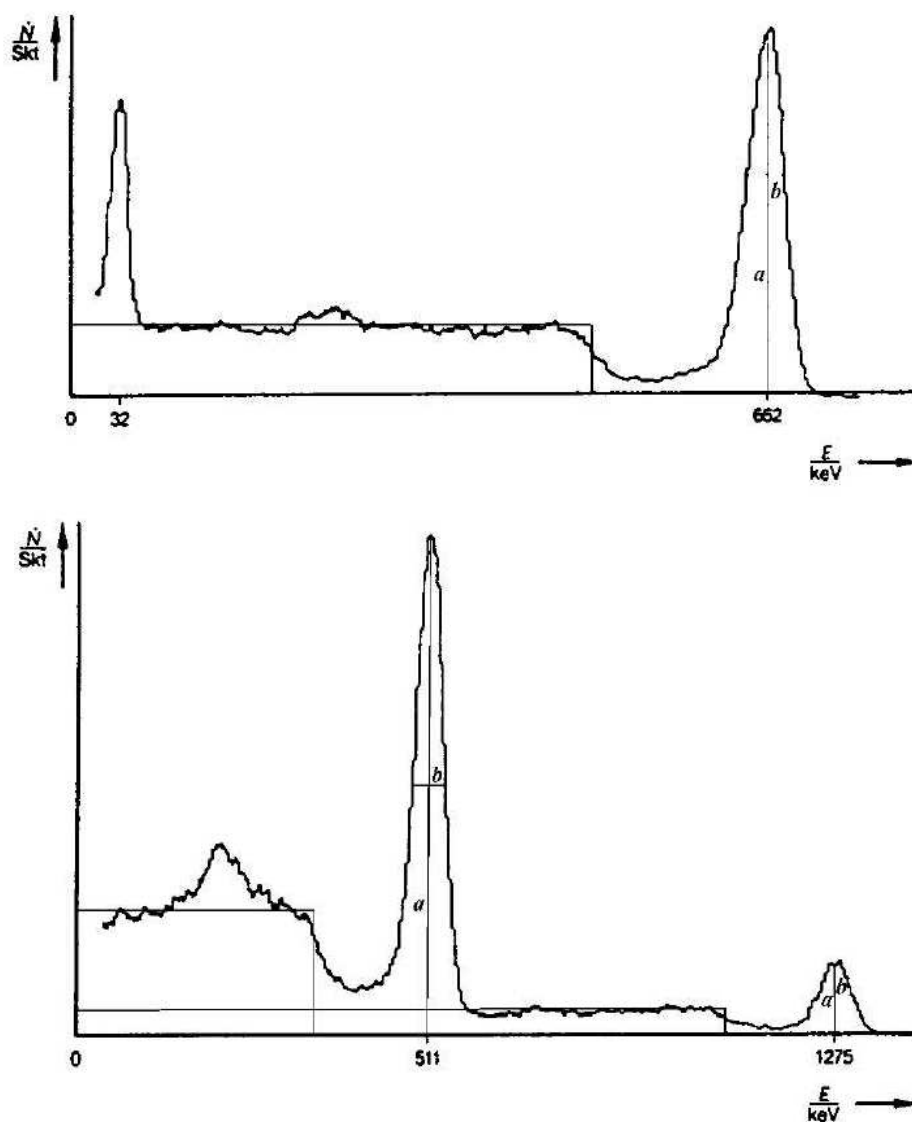


Obr. 6.3: Účinný průřez Comptonova rozptylu v závislosti na energii v MeV podle Klein-Nishinovy formule

Plochu odpovídající Comptonovu integrálnímu účinnému průřezu A_c počítáme jako výpočet obdélníkové plochy, která je dána výškou Comptonova plató a délkou od nulové energie až ke Comptonově hraně. Poměr ploch ve spektru odpovídající jednotlivým procesům je úměrný poměru velikostí integrálního účinného průřezu pro daný proces. Comptonovské pozadí má přibližně obdélníkovitý tvar. Spektrum cesia Cs obsahuje navíc linku rentgenovského záření na počátku spektra, tato linka musí být zanedbána. Ve spektru cesia je jako výchozí bod energie 662 keV pro vyhodnocení fotoefektu a Comptonův účinný průřez je vyhodnocen z plochy obdélníku odpovídající Comptonovu pozadí. Signál Gaussovského tvaru ve spektru je tzv. sumační pík, do nějž přispívají všechny procesy, kdy je gama pohlceno v detektoru. Předpokládáme, že pro nižší energie vstupního gama záření převládá při průchodu detektorem především fotoefekt a Comptonův jev. Z tohoto důvodu se sumační pík bere jako signál pocházející převážně od fotoefektu. U sodíku je linka odpovídající fotoefektu 1 275 keV, ze které vyhodnotíme plochu pro odhad účinného průřezu fotoefektu a u odpovídajícího comptonovského pozadí. Signál v oblasti energie

511 keV je tzv. anihilační pík a odpovídá gama záření pocházející z anihilace pozitronu a elektronu, při níž vznikají dvě gama kvanta s energií 511 keV, viz obr. 6.4.

Ve spektru sodíku ^{22}Na tedy sledujeme vlastně spektrum gama kvant dvou energií, jednak energie gama kvanta vyzářeného sodíku a jednak gama kvanta, které vznikne anihilací $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ mimo objem detektoru. K tomu je zapotřebí, aby bylo dostatek pozitronů e^+ , které jsou produkovány rovněž sodíkovým zdrojem, neboť se současně jedná o pozitronový zářič.



Obr. 6.5: Spektra gama záření pro jednotlivé prvky – cesium Cs (nahore) a sodík Na (dole).

Úkoly

1. Změřte spektrum gama záření radioaktivních zdrojů cesia ^{137}Cs a sodíku ^{22}Na s využitím scintilačního detektoru a zobrazte tato spektra pomocí xyt rekordéru nebo v počítači pomocí programu ISES.

2. Určete poměr efektivního účinného průřezu Comptonova jevu a fotoelektrického jevu v závislosti na energii a vynesete tyto poměry do grafu v závislosti na energii.
3. Použijte hodnoty účinného průřezu pro Comptonův rozptyl odečtené z obr. 6.3 podle Klein-Nishinovy formule a vypočtete z naměřených poměrů efektivních účinných průřezů Comptonova rozptylu a fotoefektu účinný průřez pro fotoefekt a vynesete do grafu v závislosti na energii.

Potřeby

Předsilovač pro scintilační detektor, scintilační detektor, analyzátor výšky pulsů, operační jednotka pro gama detektor, držák zdroje a detektoru, osciloskop, 20 MHz, zdroj cesia ^{137}Cs a sodíku ^{22}Na (74 kBq), *xyt* zobrazovací jednotka.

Kontrolní otázky



- Jak funguje scintilační detektor a jaký je rozdíl mezi detekcí gama záření v kapitole 3 a detekcí alfa částic v kapitole 2?
- Pokuste se zjistit, jak vzniká ve spektru cesia Cs signál v nízkoenergetické části spektra ? (Nápověda: jedná se o signál rentgenovského záření).



Obr. 6.6: Celkové uspořádání experimentu

Postup měření

1. Uspořádání experimentu je pevně dáno dle obrázku 6.5. Detekční aparát musí být kalibrován před započítím každého měření.

Použijte následující nastavení

- *Napětí detektoru* 2,5 dílku (725 V) škály pro cesium; 2 dílky (700 V) škály pro sodík.
- *Analyzátor výšky pulsů* – Mode of operation: automatic Okno: 200 mV
- *Magnifer* – Off Base: 10.00 dílků škály (10 V)
- *Zesílení* – Jemné nastavení se provede s osciloskopem tak, že nejvyšší signál na analogovém výstupu dosahuje výšky 9 V.
- *Recorder* – Vstupní zesílení musí být v souvislosti s formátem papíru a je třeba přesně nastavit nulový bod zobrazení na xyt zapisovači. Nastavíme 1 cm – 0,5 V v ose x i y.
- Alternativně k zobrazovací jednotce (xyt zapisovač) lze použít zpracování dat na počítači přepojením signálu z výškového analyzátoru pulsů do ovládacího panelu soupravy ISES. Pro zapojení do ovládacího panelu použijte manuál ISES. Následně lze zobrazovaná spektra ukládat a vyhodnocovat v programu ISES.