

Měření spektra gama záření scintilačním počítačem

Abstrakt

Gama spektroskopie je disciplína, která měří a vyhodnocuje spektra gama zářičů. Je široce využívaná v dozimetrii a jaderné fyzice. Dovoluje nám určit mnoho vlastností zdrojů gama záření, zejména strukturu energetických hladin jader.

Pomůcky: Scintilační detektor, zdroj vysokého napětí NL2410, jednonábový analyzátor PHYWE, čítač impulsů NL2301, multikanálový analyzátor PHYWE, osciloskop, osobní počítač, zdroje gama záření, USB link PASCO 2100, olověné destičky, program pro datový sběr Data Studio, program MEASURE

1 Základní pojmy a vztahy

Gama záření rozumíme elektromagnetické záření vysílané z atomového jádra, narušitel od rentgenového záření, které vychází z vnitřních slupek atomového obalu. V širším slova smyslu je to záření s energií vyšší než 100 keV. Každý zdroj gama záření můžeme charakterizovat spektrem, tj. závislostí intenzity (čili počtem fotonů) na energii (vlnové délce, frekvenci) záření. Studium spekter gama zdrojů se zabývá spektrometrie záření gama.

Gama záření (foton) vzniká jako doprovodný jev při α či β radioaktivní přeměně atomových jader, avšak v přírodě neexistuje žádný čistý gama zářič. Radioaktivita je jev, při kterém se z jádra atomů určitého prvku samovolně přeměňují na jádra jiného prvku, přičemž je emitováno vysokoenergetické záření, v případě α záření je to jádro helia, u β záření jsou to elektrony nebo pozitrony. Veličina charakterizující rychlost přeměny jader se nazývá aktivita A . Aktivita udává počet jader, který se přemění za jednotku času, tj. $A = -\frac{dN(t)}{dt}$, jednotkou aktivity je Becquerel (jeden rozpad za vteřinu). Rozpad jádra je pravděpodobnostní jev, takže nelze předpovědět čas, kdy se dané jádro přemění. Počet jader, který je v daný časový okamžik ve vzorku, se řídí exponenciálním zákonem radioaktivního rozpadu

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

kde N_0 je počáteční počet jader, λ je tzv. rozpadová konstanta, která udává střední pravděpodobnost rozpadu. Důležitou veličinou je jednotka času, za který se rozpadne právě polovina původního množství jader, nazýváme ji poločas rozpadu $T_{1/2}$. Mezi rozpadovou konstantou a poločasem rozpadu platí vztah

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}.$$

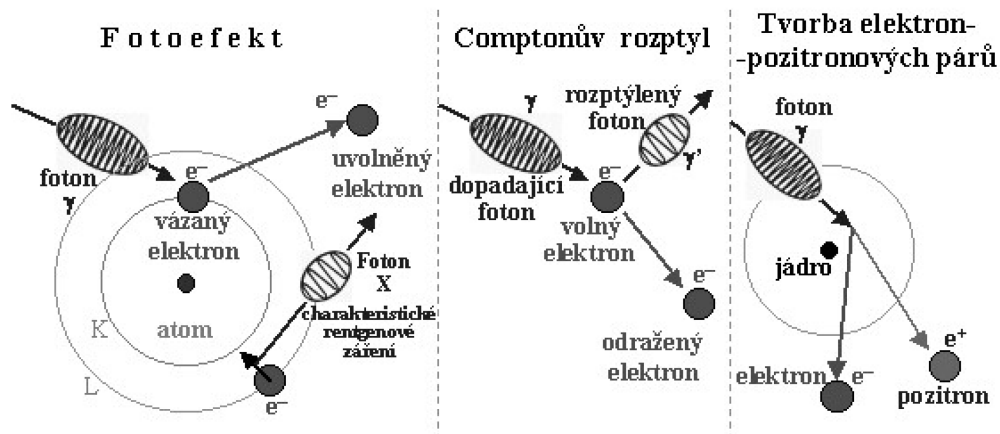
Po uplynutí doby rovné desetinásobku poločasu rozpadu, můžeme vzorek považovat za neaktivní.

Pokud při α či β přeměně se dceřinné jádro nenachází v základním stavu, dochází při přechodu do tohoto stavu k vyzáření jednoho či několika gama fotonů, kde energie fotonů je dána rozdílem energií jednotlivých hladin.

Detekce gama záření

Protože gama fotony nenesou elektrický náboj, nemůžeme je detekovat přímo. (Přímými metodami můžeme detekovat pouze částice mající elektrický náboj či magnetický moment.) K detekci fotonů využíváme tři hlavní procesy (viz. Obrázek 1):

- vnitřní fotoelektrický jev (**fotoefekt**): foton interaguje s elektronem vázaným v atomovém obalu (přednostně na vnitřních slupkách, zejména na K-slupce) tak, že mu předá veškerou svou energii, a elektron se z vazby uvolní. Elektron nese kinetickou energii $T = E_\gamma - E_B$, kde E_B je vazební energie elektronu na dané slupce. Tento elektron již můžeme detekovat standardními detekčními metodami. Po takto uvolnění elektronu je jeho místo zaplněno elektronem z vyšší energetické slupky za vyzáření rentgenového fotonu, a tak dále až do obnovení stabilní konfigurace atomového obalu. Kromě vyzáření rentgenového fotonu, může být energie předána přímo elektronu z vyšší slupky a ten je také uvolněn, jde o tzv. Augerův elektron. Fotoefekt se uplatňuje především u gama záření s nižšími energiemi, nejčastěji nastává na nejnvnitřnější slupce - K.
- **Comptonův rozptyl**: je pružný rozptyl fotonu na volném nehybném elektronu. Ve skutečnosti však elektron není v klidu a je vázaný v atomu, avšak jeho kinetická energie je vůči energii fotonu zanedbatelná. Comptonův rozptyl nastává zejména na elektronech z vnějších slupek obalu, takže je můžeme považovat za volné a nehybné. Při této srážce foton předá část své energie elektronu a pokračuje jiným směrem s menší energií a elektron je



Obrázek 1: Interakce fotonů s hmotou.

odražen. Kinetická energie odraženého elektronu je $T = E_\gamma - E'_\gamma$, kde E'_γ je energie rozptýleného fotonu daná vztahem:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos\theta)},$$

kde θ je úhel rozptylu fotonu. Tento proces se uplatňuje při středních a vyšších energiích fotonu.

- **tvorba elektronových-pozitronových párů:** foton s dostatečně vysokou energií (v poli jádra větší než $2mc^2$, méně pravděpodobněji v poli elektronu $4mc^2$) se může přeměnit na dvojici elektron-pozitron. Pozitron téměř okamžitě v látce anihiluje s některým z jejích elektronů za vzniku dvou fotonů, každý o energii 511 keV.

Spektrum gama záření

Spektrum je závislost intenzity záření na jeho energii. Typické spektrum je znázorněno na Obrázku 1.

V oblasti nejnižších energií (1) pozorujeme elektronický a radiační šum okolí. Do oblasti (2) spadají rentgenové fotony charakteristického záření z atomového obalu dceřinných jader. Pík (3) se nazývá pík zpětného rozptylu. Tento pík má původ v Comptonově rozptylu fotonu (do úhlu 180°) v okolí detektoru s následnou detekcí takto rozptýleného fotonu v aktivní oblasti detektoru. Široká oblast (4) se nazývá Comptonovské kontinuum, které je ukončeno Comptonovou hranou (5). Comptonova hrana vzniká kvůli Comptonovu rozptylu do úhlu 180° uvnitř aktivního objemu detektoru s následným únikem rozptýleného fotonu z této oblasti.

Pro energie gama fotonu menší než 250 keV polohy píku zpětného rozptylu a Comptonovy hrany jsou zaměněny, tj. Comptonova hrana se nachází při nižších energiích než pík zpětného rozptylu. Spojitá oblast (6) mezi Comptonovou hranou (5) a píkem plného pohlcení (7) je v důsledku mnohonásobného Comptonova rozptylu. Energie píku plného pohlcení (7) udává celkovou energii detekovaného fotonu. U β zářičů se může za píkem plného pohlcení objevit široké pozadí (8) způsobené detekcí brzděného záření emitovaného elektronu, který má větší kinetickou energii než doprovodný gama foton. Tato oblast končí při energii rovné kinetické energii elektronu.

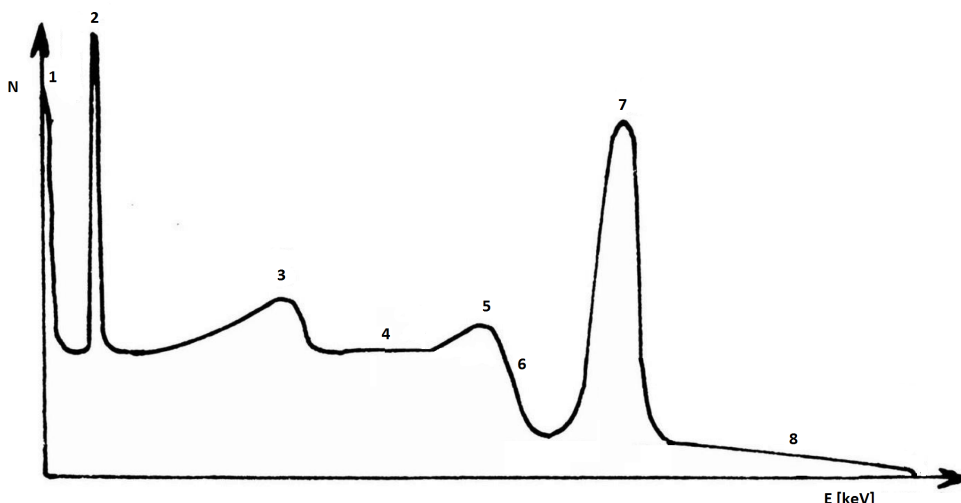
Ve spektru můžeme dále pozorovat tzv. součtové píky. Tyto píky vznikají v důsledku současné detekce jinak dvou (i více, avšak méně pravděpodobně) nezávislých procesů. Např. součet rentgenového píku (2) a fotopíku (7) nebo, má-li zářič kaskádní přechod s emisí více gama fotonů, mohou se sčítat energie příslušných fotopíků nebo dokonce i energie patřící jinak do jediného píku, tj (7) a (7).

Při detekci gama záření s energií větší než 1022 keV, se ve spektru mohou vyskytovat tzv. únikové píky. Takto energetický foton v oblasti detektoru vytváří elektronový-pozitronový pár s téměř okamžitou anihilací pozitronu za vzniku dvou gama fotonů s energií 511 keV. Pokud v detektoru zachytíme oba tyto fotony a elektron z páru, získáme pík plného pohlcení. Jestliže ale zachytíme jen jeden foton (druhý opustí objem detektoru) a elektron z páru, ve spektru pozorujeme tzv. první úíkový pík, jehož energie je o 511 keV nižší než energie píku plného pohlcení. Když oba anihilační fotony opustí oblast detektoru a detektor tedy zaregistruje pouze elektron z páru, ve spektru pozorujeme druhý únikový pík, jehož energie je o 1022 keV menší než energie píku plného pohlcení. Aby to vše nebylo jednoduché, tyto únikové píky se navíc mohou sčítat s dalšími píky.

U β^+ zářičů obvykle pozorujeme pík kolem energie 511 keV, kvůli anihilaci emitovaného pozitronu s elektronem v prostředí mezi zářičem a detektorem. (Méně pravděpodobná je detekce obou anihilačních fotonů a pozorování píku s energií 1022 keV.)

Metody měření spektra

Máme v podstatě tři možnosti jak zpracovat signál z detektoru.

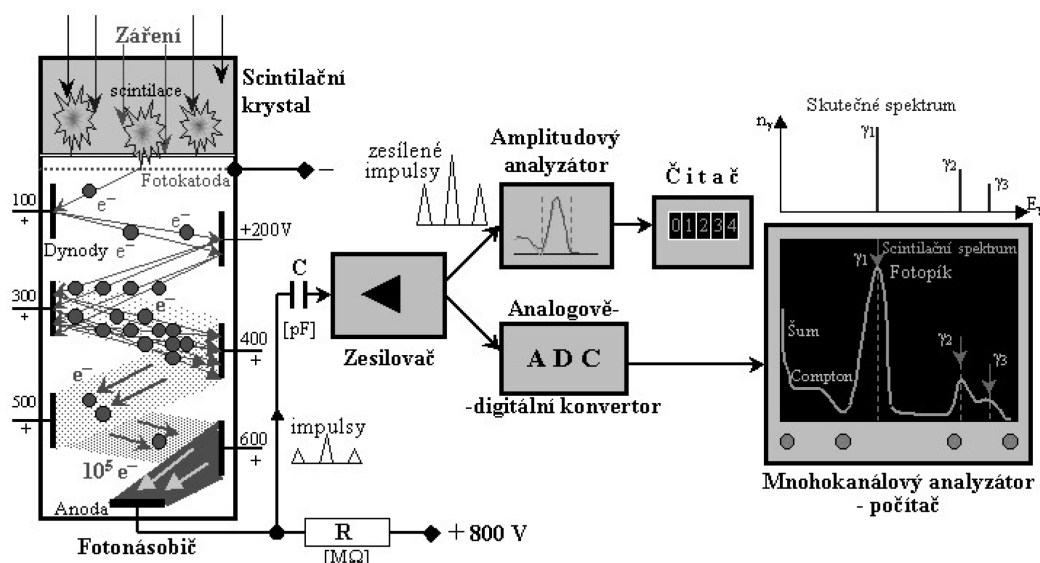


Obrázek 2: Schematický náčrt typického spektra záření gama

- **Manuální měření:** Při tomto měření využíváme amplitudového analyzátoru, na kterém nastavíme tzv. dolní a horní diskriminační hladinu, či-li tzv. okno (kanál). Jestliže do analyzátoru přijde signál o vhodné amplitudě, že se vejde do příslušného okna, analyzátor tento signál propustí k dalšímu zpracování. Jestliže je ale amplituda signálu větší či menší než je hodnota okna, analyzátor tento signál zamítne. Při tomto měření tedy můžeme využít analogový čítač. Pro každé okno změříme po určitou pevnou dobu počet impulsů.
- **Jednokanálový analyzátor:** Princip je v úplně stejný jako u manuálního měření, avšak analyzátor automaticky projíždí okno po okně a po určitou dobu v něm měří počet částic. Výstupem jsou pak napětí úměrné poloze okna a další napětí úměrné počtu částic.
- **Multikanálový analyzátor:** Princip spočívá v tom, že měříme po celou dobu všechny kanály najednou. Analyzátor změří amplitudu pulzu a podle její velikosti, daný signál zařadí do příslušného kanálu. Tento způsob bývá nejpoužívanější.

Scintilační detektor

Nyní se dostaneme k popisu funkce detektoru. Budeme používat scintilační detektor, jehož princip je na Obrázku 1



Obrázek 3: Schéma scintilačního detektoru. (Převzato z [1])

Scintilátor je látka schopná reagovat světelnými záblesky (scintilacemi) na pohlcení kvanta záření. Tyto světelné záblesky jsou pak elektronicky registrovány pomocí fotonásobiče. Pro gama záření použijeme monokrystal NaI(Tl) (někdy se značí NaI:Tl) - jodid sodný aktivovaný thaliem. Když foton o dostatečné energii vletí do krystalu, excituje elektrony z valenčního pásu do vodivostního. Při deexcitaci elektron vyzáří foton nejčastěji ve viditelné oblasti světla. Tento foton by, v nepřítomnosti thaliových atomů, mohl být opět pohlcen excitací jiného elektronu z valenčního pásu. Avšak thalium způsobí, že v zakázaném pásu (pás mezi vodivostním a valenčním, kde se nevyskytují žádné elektrony) vzniknou dodatečné energetické hladiny, jedna těsně pod vodivostním a druhá nad valenčním pásem. Elektron při deexcitaci z vodivostního pásu, přejde nejprve nezářivým procesem na horní hladinu thaliové příměsi a až potom deexcituje na dolní hladinu thaliové příměsi, za vyzáření viditelného fotonu. Pak přejde nazpět do valenčního pásu opět nezářivým procesem. Takto emitovaný foton již nemůže být pohlcen krystalem - má energii menší než je potřeba k excitaci elektronu z valenčního pásu do vodivostního - (krystal se pro něj stane průhledným) a doputuje až na fotokatodu fotonásobiče. Fotokatoda je vyrobena z materiálu s nízkou výstupní prací a foton, který na ni dopadne, z ní vyrazí několik elektronů. Tyto elektrony cestují do násobícího systému - na tzv. dynody. Dopadem na dynodu elektron vyrazí opět několik elektronů, tento proces pokračuje až ke sběrné anodě. Mezi dynodami je potenciálový spád, který vyražené elektrony urychlí tak, aby mohly na další dynodě vyrazit další elektrony. Z anody sebraný signál vedeme do analyzátoru.

Stínění gama záření

Při průletu svazku fotonů látkou se nemění jejich energie, ale následkem srážek se postupně zmenšuje proud fotonů. (Ostatní fotony, které při interakci v látce zmenšily svou energii, změnily svůj směr letu a tudíž už dále nepatří do svazku.) Zeslabení monoenergetického svazku fotonů probíhá podle exponenciálního zákona

$$I(d) = I_0 e^{-\mu d},$$

kde $I(d)$ je intenzita svazku prošlého materiálem o tloušťce d , I_0 je počáteční intenzita a μ se nazývá lineární koeficient útlumu. Tohoto exponenciálního útlumu intenzity se využívá při stínění gama záření. Pro stínění gama záření se nejčastěji využívají materiály s vysokým atomovým číslem, zejména olovo.

2 Pracovní úkoly

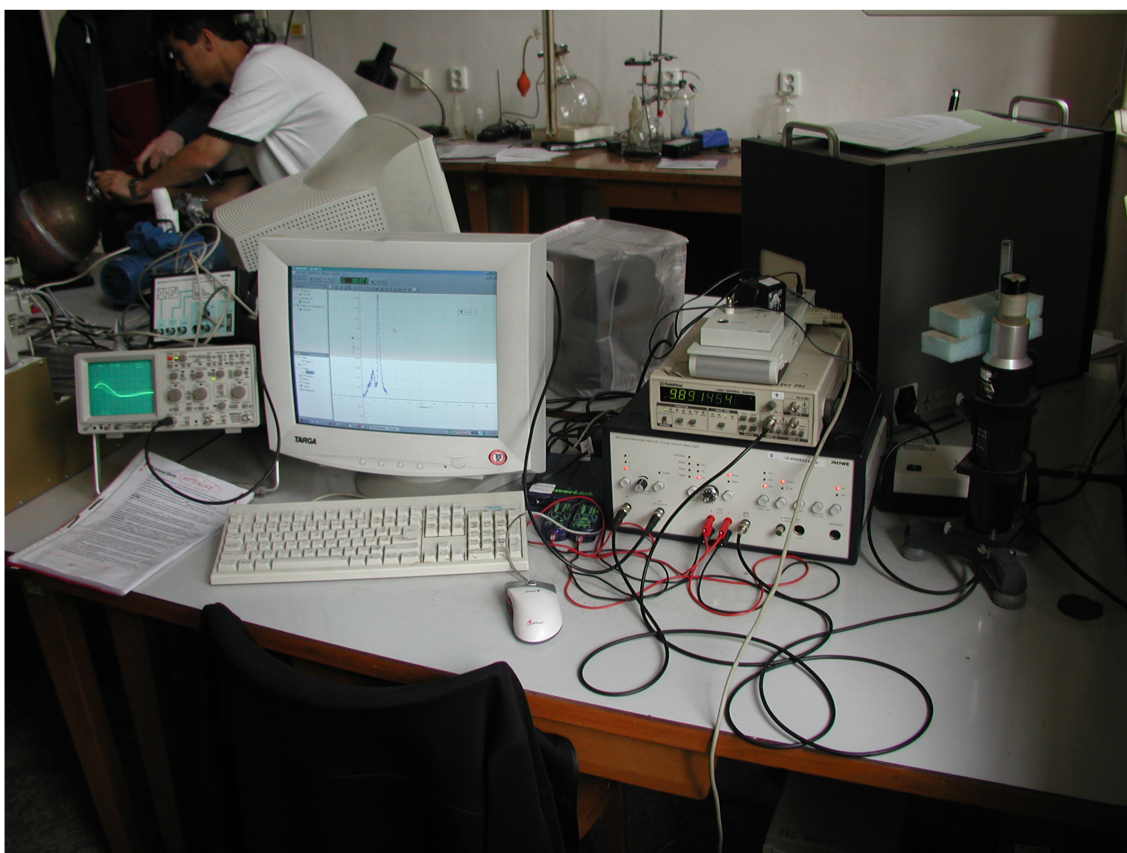
- Osciloskopem pozorujte spektrum ^{137}Cs na výstupu z jednobanového analyzátoru. Načrtněte tvar spektra. (Osciloskop ukazuje tvary a amplitudy jednotlivých pulzů. Počet pulzů je dán intenzitou čáry a energie výškou impulzu.)
- Naměřte spektrum impulzů ^{137}Cs jednobanovým analyzátozem pomocí manuálního měření. Okno volte o šířce 100 mV. Spektrum graficky zpracujte.
- Naměřte spektrum impulzů ^{137}Cs jednobanovým analyzátozem pomocí automatického měření. Okno volte o šířce 100 mV. Spektrum graficky zpracujte.
- Mnobanovým analyzátozem naměřte jednotlivá spektra přiložených zářičů (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am a ^{133}Ba). (Spektrum nabírejte 15 minut.)
- Pomocí naměřených spekter najděte kalibrační křivku spektrometru, závislost rozlišení spektrometru na energii záření.
- Z naměřeného spektra ^{137}Cs určete určete hodnotu píku zpětného rozptylu, Comptonovy hrany, energii rentgenového píku a energii součtového píku.
- Mnobanovým analyzátozem naměřte spektrum neznámého zářiče. Určete tento zářič, pozorujte a zaznamenejte další jevy v jeho spektru. (Spektrum nabírejte 15 minut.)
- Mnobanovým analyzátozem naměřte spektrum pozadí v místnosti (zářiče uschovejte v trezoru). Najděte v pozadí přirozené zářiče a toto pozadí odečtěte od všech zaznamenaných spekter ještě před jejich vyhodnocením. (Pozadí nabírejte 15 minut.)
- Graficky určete závislost koeficientu útlumu olova na energii gama záření. (Použijte všechny zářiče současně. Jednotlivá spektra nabírejte 5 minut, nezapomeňte opět nabrat pozadí.)

3 Postup měření

- Manuální měření spektra:** Zapojte výstup ze scintilátoru na do vstupu jednobanového analyzátoru (INPUT). Zapněte zdroj vysokého napětí, jednobanový analyzátor a čítač impulsů. Přepněte jednoban do manuálního módu pomocí tlačítka pod led diodou AUTO×MAN. Připojte osciloskop na analogový výstup OUT

OSCILOSCOPE a čítač na výstup Σ . Nastavte dolní diskriminační hladinu pomocí kolečka BASE a šířku okna pomocí tlačítka FENSTER. Začněte s dolní diskriminační hladinou 0 a pevnou šířkou okna. Zaznamenejte hodnotu z čítače. Ta je dána ve formě počet impulsů za sekundu. Poté posuňte základnu o šířku okna a znovu zaznamenejte hodnotu. Takto pokračujte až do 10V.

- **Měření jednobanálním analyzátořem:** Ponechte zapojení z manuálního měření. Zvolte tlačítkem mód AUTO a potenciometr nastavte na 10V. Nyní je třeba nastavit čas, po který analyzátoř zůstane v každém okně. Volba je v podstatě libovolná. Výstupy X a Y je třeba pomocí modulů PASCO připojit k počítači. V programu DataStudio potom otevřete graf, kde příslušná napětí zobrazte na x-ovou resp. y-ovou osu. Zmačknete START na analyzátořu i v DataStudiu. Pokud změníte jakékoli nastavení na analyzátořu, je třeba ho resetovat tlačítkem RESET.
- **Měření mnohobanálním analyzátořem:** Zapojte výstup ze scintilátora na vstup (INPUT) a osciloskop na analogový výstup z multikanálu. Zároveň by měl být multikanál zapojen kabelem do USB slotu na počítači. Otevřete program MEASURE a zmačknete v něm na liště tlačítko s červeným kolečkem. Měla by se objevit volba, v které zaškrtnete "měření spektra." Měření začne automaticky. Pokud ho chcete zastavit "odškrtnete" políčko START/STOP. Po uplynutí doby měření, zmačknete ACCEPT DATA a spektrum uložete jako čísla do textového souboru (při zadávání jména musíte dopsat i příponu).



Obrázek 4: Zapojení jednobanálního analyzátořu.

4 Poznámky

- Během práce dodržujte bezpečnostní předpisy a pravidla pro práci se zdroji záření. Po skončení měření je nutné předat pracoviště asistentovi.
- Napětí na zdroji VN volte v rozsahu 600 - 1000 V. Doporučená hodnota je 800V.
- Spektrum, které zde měříte se dříve nazývalo diferenciální spektrum. Integrální spektrum vznikalo tak, že místo dvou diskriminačních hladin existovala pouze jedna a v každém bodě se vynášel počet částic s energií vyšší než daná hladina. Spektrum bylo tedy klesající a potom se numericky diferencovalo. Integrální spektrum bylo používáno proto, že byl problém obsluhovat dvě diskriminační hladiny (z elektronického hlediska). Dnes již tento problém odpadl a integrální spektrum se téměř nepoužívá.

- Tvar spektra je ovlivněn rozlišovací schopností (rozlišením) spektrometru. Pro danou energii E se rozlišovací schopnost udává pomocí šířky ΔE píku úplného pohlcení v polovině jeho výšky (FWHM). Vyjadřuje ji veličina $S = \frac{\Delta E}{E}$, případně v procentech vynásobena 100%.
- Před zapnutím počítače musí být zapnuty všechny přístroje používané při měření, jinak je počítač nerozezná.
- Kalibrační křivka detektoru vyjadřuje závislost energie na čísle kanálu. Nejčastěji to bývá lineární závislost.
- Energetickou závislost rozlišení detektoru určíte tak, že pro jednotlivé energie píků určíte veličinu S .
- Při měření koeficientu útlumu měřte plochy jednotlivých píků ve spektrech, počáteční intenzitu určete bez vložených olověných destiček.

Reference

- [1] Ullmann, V.: Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. <http://www.sweb.cz/AstroNuklfyzika/DetekceSpektrometrie.htm>