

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.

1 Pracovní úkoly

1. DÚ: Pomocí rovnice (1) sestavte diferenciální rovnici a jejím řešením odvoďte zákon radioaktivního rozpadu (2). S jeho pomocí dále podle definice odvoďte vztah (3) pro poločas rozpadu.
2. DÚ: Sestavte kalibrační křivku podle zadání v poznámkách.
3. Naměřte spektrum impulzů ^{137}Cs jednokanálovým analyzátozem pomocí manuálního měření v rozmezí 0,1 – 2,5 V. Spektrum graficky zpracujte.
4. Změřte závislost intenzity svazku gama záření na tloušťce olova, kterým toto záření tlumíme. Naměřte alespoň 10 hodnot intenzity pro různé tloušťky olova (0 až 9 olověných destiček, použijte zářič ^{137}Cs , každé spektrum nabírejte 2 minuty). Nafitováním této závislosti určete koeficient útlumu olova.
5. Mnohokanálovým analyzátozem naměřte spektrum pozadí v místnosti (zářiče uschovejte do trezoru). Najděte v pozadí přirozené zářiče a toto pozadí odečtěte od všech zaznamenaných spekter ještě před jejich vyhodnocením (pozadí nabírejte 10 minut).
6. Mnohokanálovým analyzátozem naměřte jednotlivá spektra přiložených zářičů (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am a ^{133}Ba). Určete výrazné píky a porovnejte je s tabulkovými hodnotami (každé spektrum nabírejte 10 minut. Před zpracováním odečtěte pozadí - viz úkol 5 a přepočítejte spektrum pomocí kalibrační křivky - viz úkol 8).
7. Na naměřeném spektru ^{137}Cs popište důležité jevy.
8. Pomocí zářičů ^{137}Cs , ^{60}Co a ^{133}Ba určete kalibrační křivku spektrometru a použijte ji při zpracování všech spekter naměřených mnohokanálovým analyzátozem (spektrum nemusíte nabírat znovu, použijte data z předchozího měření). Graficky znázorněte kalibrační křivku.
9. S využitím všech naměřených spekter určete závislost rozlišení spektrometru na energii gama záření (je definováno jako poměr šířky fotopíku v polovině jeho výšky k jeho energii - viz sekce 3.4).
10. Mnohokanálovým analyzátozem naměřte spektrum neznámého zářiče. Určete tento zářič, porovnejte a zaznamenejte další jevy v jeho spektru (spektrum nabírejte 10 minut).

2 Pomůcky

Pomůcky: Scintilační detektor, zdroj vysokého napětí ORTEC 556, zesilovač ORTEC 570, jednokanálový analyzátor ORTEC 550A, multikanálový analyzátor ORTEC 928, univerzální čítač, osobní počítač, program Maestro, zdroje gama záření (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{133}Ba a neznámý zářič), olověné destičky, stopky.

3 Základní pojmy a vztahy

3.1 Gama záření

Gama zářením rozumíme vysokoenergetické elektromagnetické záření s energií fotonu vyšší než 10 keV^1 [1]. Každý zdroj gama záření můžeme charakterizovat jeho spektrem. Studium spektra gama zdrojů se zabývá spektrometrie záření gama.

Na rozdíl od méně energetického rentgenového záření, které může vznikat při přechodech ve vnitřních slupkách atomových obalů, jsou pro vznik gama záření potřeba přechody v atomových jádrech. Gama záření typicky doprovází radioaktivní přeměnu jader, při které se uvolňuje částice α (jádro helia) nebo částice β (elektron nebo pozitron). Pokud se při α či β přeměně dceřiné jádro nachází v excitovaném stavu, dochází při přechodu do základního stavu k vyzáření jednoho či několika gama fotonů, jejichž energie je dána rozdílem energií jednotlivých hladin v jádře.

My se budeme zabývat zářením vzniklým při radioaktivních přeměnách. Veličina charakterizující rychlost přeměny jader se nazývá aktivita a typicky se značí A . Aktivita udává počet jader, který se ve vzorku přemění za jednotku času, tj. $A = -\frac{dN(t)}{dt}$, kde N je celkový počet částic ve vzorku. Jednotkou aktivity je Becquerel (jeden rozpad za vteřinu). Rozpad jádra je pravděpodobnostní jev, takže nelze předpovědět čas, kdy se dané jádro přemění. Můžeme však určit takzvanou rozpadovou konstantu λ , která udává střední pravděpodobnost rozpadu daného jádra za jednotku času. Platí tedy vztah mezi aktivitou a rozpadovou konstantou

$$A(t) = \lambda N(t). \quad (1)$$

Dosažením definice aktivity $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$ získáme diferenciální rovnici, jejímž řešením je známý exponenciální zákon radioaktivního rozpadu:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

kde N_0 je počáteční počet jader, tedy $N_0 = N(0)$.

Související často používanou veličinou je poločas rozpadu $T_{1/2}$, což je doba, za kterou se rozpadne právě polovina původního množství jader. Mezi rozpadovou konstantou a poločasem rozpadu platí vztah

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (3)$$

Po uplynutí doby rovné desetinásobku poločasu rozpadu klesne aktivita na méně než tisícinu původní hodnoty a často pak můžeme vzorek považovat za téměř neaktivní.

3.2 Interakce gama fotonů s látkou

V prvním kroku detekce je třeba, aby ve scintilátoru gama fotony předaly svou energii (najednou nebo postupně) elektronům (případně pozitronům), které mohou následně masově ionizovat a excitovat atomy. Existují tři základní procesy, které tento převod energie umožňují: fotoefekt, Comptonův rozptyl a vznik elektron-pozitronových párů.

¹druhy záření se ve skutečnosti rozlišují dle svého zdroje, takže tato hodnota je spíše orientační

3.2.1 Fotoefekt

Fotoefekt (neboli fotoelektrický jev) je proces, při kterém foton interaguje s elektronem vázaným v atomovém obalu tak, že mu předá veškerou svou energii. Děj probíhá přednostně na vnitřních slupkách atomového obalu, zejména na K-slupce. Gama foton tímto procesem tedy zcela zaniká a z obalu atomu je uvolněn elektron, jehož kinetická energie je $T = E_\gamma - E_B$. Zde E_γ je celková energie původního gama kvanta a E_B vazebná energie elektronu.

3.2.2 Comptonův rozptyl

Modelově se jedná o pružný rozptyl fotonu na elektronu v materiálu. Při této srážce foton předá pouze část své energie elektronu a rozptýlí se o úhel θ . Energie rozptýleného fotonu je dána vztahem

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos \theta)}, \quad (4)$$

kde m je hmotnost elektronu, c rychlost světla a E_γ je energie fotonu před srážkou. Úhel rozptylu θ je náhodný, a proto při tomto procesu vznikají elektrony s různou hodnotou kinetické energie od $T = 0$ pro $\theta = 0$ až po maximální energii

$$T_{max} = E_\gamma \left(\frac{2E_\gamma/mc^2}{1 + 2E_\gamma/mc^2} \right) \quad (5)$$

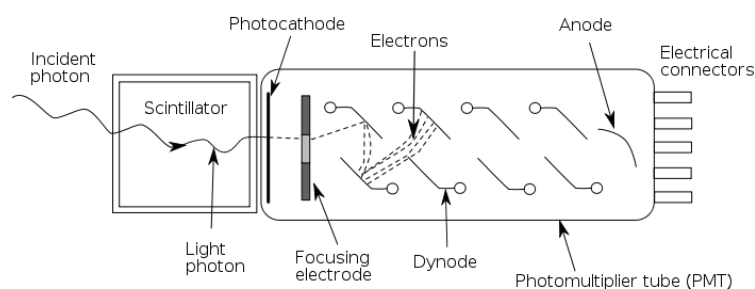
pro $\theta = \pi$.

3.2.3 Tvorba elektronových-pozitronových párů

Foton s dostatečně vysokou energií se může přeměnit na dvojici elektron-pozitron. Elektron a pozitron poté nesou zbytek energie fotonu v podobě kinetické energie, tedy $T_{e^+} + T_{e^-} = E_\gamma - 2mc^2$. Poté, co pozitron ztratí svou kinetickou energii, anihiluje s nějakým elektronem v látce za vzniku dvou gama fotonů vyletujících v opačných směrech, z nichž každý nese energii $mc^2 = 511$ keV.

3.3 Detekce gama záření

Pro detekci gama záření budeme používat **scintilační detektor**, jehož jednoduché schéma je na Obr. 1. Detektor se skládá ze dvou částí: scintilátoru a fotonásobiče.



Obr. 1: Schéma scintilačního detektoru.

Scintilátor je krystal, na který dopadají gama fotony, jejichž energii chceme měřit, zde interagují s atomy krystalu a předávají svou energii elektronům. Urychlené elektrony poté ionizují

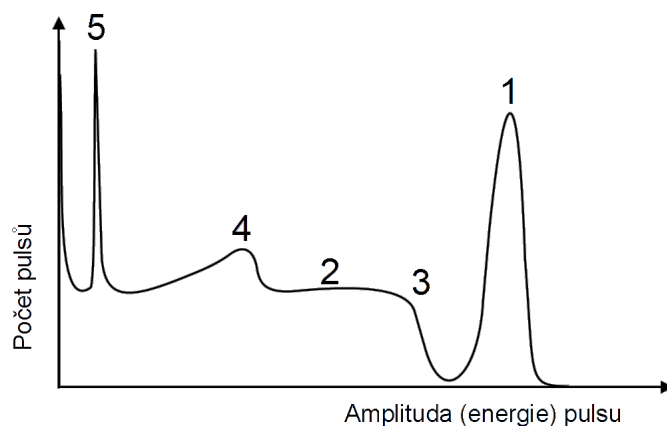
a excitují ostatní atomy krystalu. Při deexcitaci atomy vyzařují fotony viditelného světla, které přechází do fotonásobiče.

Při vstupu do fotonásobiče fotony viditelného světla narážejí na fotokatodu, ze které vyrazí malé množství elektronů. Vyražené elektrony putují na kaskádu dynod. Vysoké napětí na dynodách elektrony urychluje a ty z každé další dynody vyrazí větší množství elektronů. Tím vznikne na koncové anodě měřený makroskopický elektrický signál, jehož intenzita je úměrná množství a energii fotonů dopadajících do fotonásobiče.

Podrobnější informace o scintilačních detektorech naleznete v [2].

3.4 Spektrum gama záření

Spektrum je závislost intenzity záření (počtu fotonů) na jeho energii. Pokud bychom mohli pozorovat přímo spektrum gama fotonů vznikajících v jaderných rozpadech zářičů, viděli bychom jen velice ostré píky odpovídající přímo energii příslušného gama záření. My však pozorujeme výsledek všech procesů, které probíhají v našem detektoru. Typické výsledné spektrum je znázorněno na Obr. 2.



Obr. 2: Ukázka spektra na výstupu při detekci gama záření. Číslování na obrázku je shodné s popisem níže.

Nyní popíšeme jednotlivé procesy, které můžeme v tomto spektru vidět:

1. Může dojít k fotoefektu, při kterém původní foton zcela zaniká a celou svou energii odevzdá detektoru. Vzniká tak ostrý pík zvaný **fotopík**. Energie tohoto píku E odpovídá skutečné energii gama záření. Šířka tohoto píku v polovině výšky (FWHM) ΔE nám určuje rozlišení detektoru S , a to pomocí vztahu

$$S = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Pro FWHM platí vztah

$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \approx 2,355\sigma, \quad (7)$$

kde σ odpovídá směrodatné odchylce v normálním (Gaussově) rozdělení.

2. Může dojít ke Comptonovu rozptylu, při kterém dopadající foton předá pouze část své energie. Tento jev tak vytvoří ve spektru spojitou oblast zvanou **Comptonovské kontinuum**.

3. Pomocí Comptonova rozptylu dokáže foton předat maximální energii danou vztahem (5). Comptonovské kontinuum proto nezasahuje až po fotopík, ale je ukončeno **Comptonovskou hranou**, která je dána právě tímto vztahem.
4. Může se také stát, že foton ve scintilátoru nebude interagovat, ale pak se pomocí Comptonova rozptylu na obalu detektoru odrazí zpátky. V takovém případě nese zbytek energie, která mu zůstala při maximálním Comptonovském rozptylu (což číselně odpovídá rozdílu mezi 3 a 1) a chová se jako nový zdroj gama záření, který vytvoří další fotopík. Tento fotopík nazýváme **pík zpětného rozptylu**.
5. Pík, který uvidíte na začátku spektra ve skutečnosti není pík gama záření, ale pík charakteristického rentgenovského záření z atomového obalu a není pro tento úkol zajímavý.

Další efekt, který může nastat, je vznik páru elektron-pozitron, pozitron pak zpomalí a anihiluje za vzniku dvou fotonů s energií 511 keV a jeden z těchto fotonů unikne z detektoru. Při takovém jevu by mohl vzniknout pík o 511 keV menší než fotopík. V tomto úkolu však budete pracovat se zářiči, které nemají dostatečnou energii, aby se u nich takový pík vyskytl.

3.5 Stínění gama záření

Při průletu svazku fotonů látkou se typicky příliš nemění jejich energie, ale následkem srážek se postupně zmenšuje proud fotonů. (Fotony, které při interakci v látce změnil směr letu už dále nepatří do svazku.) Zeslabení monoenergetického svazku fotonů probíhá podle exponenciálního zákona

$$I(d) = I_0 e^{-\mu d}, \quad (8)$$

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.

4 Postup měření

Zapnutí jakéhokoli elektrického zařízení musí provést asistent! Při zapojování a odpojování kabelů musí být všechny přístroje vypnuty. Po vypnutí zdroje vysokého napětí počkejte alespoň 30 vteřin, než budete připojovat nebo odpojovat jakékoli kabely.

4.0.1 Zapojení scintilátoru (společné pro všechny úlohy)

Zdroj vysokého napětí (levý panel v hnědo-bílé krabici s označením *High Voltage Power Supply*) spojte se scintilátorem (válcovité zařízení na stojanu) - zelený kabel s červenými kroužky jde do výstupu zdroje vysokého napětí (zezadu panelu) a vstupu scintilátoru (zespod), které jsou označeny červenými kroužky. Výstup ze scintilátoru (zespodu) připojte na vstup zesilovače (třetí panel zleva, označen *Amplifier*, použijte vstup zepředu označen *Input*).

4.1 Manuální měření jednokanálovým analyzátozem

Výstup zesilovače (*Unipolar Output*) připojte na vstup jednokanálového analyzátozem (pravý panel, označen *SCA*, použijte vstup zepředu označen *Input*). Výstup z jednokanálového analyzátozem

(SCA OUT) připojte na vstup univerzálního čítače (malá bílá krabice s digitálním displejem). Jakmile to budete mít, nechte si zapojení skontrolovat asistentem.

Před samotným zapnutím si ještě zkontrolujte nastavené parametry. Zdroj vysokého napětí musí být nastaven na hodnotě 750 V. Výsledná hodnota, která je nastavena, je dána součtem hodnot na všech třech tlačítkách. Zesilovač by měl mít nastaveny hodnoty: $Gain = 1$, $Coarse Gain = 100$, $Shaping Time = 0.5$. Nastavení na jednokanálovém analyzátoru je na vás, pomůže vám následující popis.

Tlačítko uprostřed jednokanálového analyzátoru má 4 módy (zavedeme značení L - *Lower Level*, U - *Upper Level*, W - *Window*):

- *INT* - pouští na výstup pouze signály o napětí vyšším nežli L
- *ASYM WINDOW* - pouští na výstup signály o napětí v rozmezí $(L; L + W)$
- *SYM WINDOW* - pouští na výstup signály o napětí v rozmezí $(L - W/2; L + W/2)$
- *NORM* - pouští na výstup signály o napětí v rozmezí $(L; U)$

Tlačítko *Lower Level* nastavuje hodnotu v rozmezí +20 mV až +10 V, přičemž vnější stupnice udává celé volty a vnitřní stupnice udává setiny voltů. Tlačítko *Upper Level / Window* má stupnici závislou na tom, v jakém režimu přístroj používáte. Pokud jste v režimu *NORM*, toto tlačítko má stejnou stupnici jako tlačítko *Lower Level*. Pokud jste v režimu *WINDOW*, toto tlačítko má stupnici v rozmezí 0 V až 1 V. V takovém případě vnější stupnice udává desetiny voltů a vnitřní stupnice udává tisíce voltů.

Při zapínání přístrojů musíte nejdříve zapnout samotnou hnědo-bílou krabici (tlačítko *POWER* úplně naspodku), pak zapnete zdroj vysokého napětí (tlačítko *POWER* na příslušném panelu) a nakonec zapnete univerzální čítač. Aby vám čítač začal skutečně počítat počet gama fotonů ve vámi nastaveném okně, musíte ho nastavit na funkci *TOTAL* pomocí šipek pod nápisem *FUNCTION*. V momentě, kdy chcete odčítat danou hodnotu, zmáčknete tlačítko *HOLD*, které vám zmrazí aktuální hodnotu a tu si můžete v klidu zapsat. Opětovným stlačením tlačítka *HOLD* se počítání znovu spustí. Pokud chcete vynulovat počítadlo, zmáčknete tlačítko *TOTAL RESET*.

Vášim úkolem je změřit oblast napětí 0,1 – 2,5 V a vytvořit v této oblasti spektrum. Je na vás, jakou zvolíte šířku okna (tím pádem i počet měření) a čas, za jaký budete nabírat data. Mějte ale na paměti, že čím déle budete nabírat data, tím bude měření přesnější, ale o to méně hodnot budete mít ve svém spektru a pak nebudete schopni rozeznat píky. **Zvolte své měření tak, aby čistá doba měření nepřesáhla 10 minut.**² Po změření tohoto úkolu určete, v jakém rozmezí napětí se nachází fotopík.

4.2 Stínění gama záření

V tomto úkolu budete používat stejné zapojení aparatury jako v předchozím úkolu. Nastavte šířku okna tak, aby obsahoval přesně fotopík (podle hodnot získaných v předchozím úkolu). V trezoru se zářiči se nachází 9 šedých olověných destiček, jejichž tloušťku si potřebujete změřit. Pak změřte počet fotonů ve fotopíku po dobu 2 minut pro různou tloušťku olova, pro vzorek bez stínění a také pro pozadí bez stínění - tuto hodnotu pak musíte odečíst od všech ostatních. Výslednou závislost počtu fotonů na tloušťce pak nafitujte rovnicí (8).

²příklad: můžete měřit 25 oken po 20 vteřinách, šířka okna tedy bude 0,1 V, nebo také 50 oken po dobu 10 vteřin a šířka okna tedy bude 0,05 V.

4.3 Měření mnohokanálovým analyzátozem

V tomto úkolu zapojte výstup ze zesilovače (*Unipolar Output*) do vstupu multikanálového analyzátoru (druhý panel zleva, označen *MCB*, použijte vstup zepředu označen *ADC IN*). Ten by už měl být připojen přímo do PC šedým USB kabelem zezadu. Hodnoty na zesilovači nemusíte pro toto měření měnit. Zapněte počítač a v něm program Maestro.

V programu Maestro si nejdříve nastavte vhodné parametry. Na horní liště musíte zvolit správný detektor, a to PRA05 Model 928. Dále klikněte na *Acquire* → *MCB Properties*. V záložce *ADC* pak nastavte *Gate*=Off, *ZDT Mode*=Off, *Conversion Gain*=1024³, *Lower Level Disc*=5⁴.
Nikdy neměňte parametry v průběhu měření!

Nabírání dat spustíte zeleným puntíkem GO nebo přes *Acquire* → *Start*. Měření zastavíte červeným puntíkem STOP nebo přes *Acquire* → *Stop*. Na horní liště si také můžete přepínat mezi logaritmickou a klasickou škálou svislé osy (*log/A*).

Nenechte se zmást tím, že vám program po kliknutí ukazuje energii v jednotkách keV. Tyto hodnoty jsou nezkalibrovány a tuto kalibraci si budete muset provést doma sami. Výstupní textové soubory proto obsahují pouze číslo kanálu.

4.3.1 Export dat

Pro export dat si nejdříve vytvořte složku na ploše. Pak v programu Maestro klikněte na *File* → *Save As* a uložte si spektrum nejprve ve formátu *Integer CHN*. Poté klikněte na *File* → *Export* a zvolte soubor, který jste právě vytvořili, čímž z něho uděláte textový soubor, který už můžete zpracovávat doma⁵. Tento textový soubor pak bude obsahovat dva sloupce, ve kterých bude číslo kanálu a počet countů v daném kanálu.

4.4 Zpracování dat

Na zpracování naměřených dat se vám bude hodit Excel. Nejdříve potřebujete od každého spektra odečíst pozadí. Následně nařítujete fotopík Gaussovým rozdělením posunutým o konstantu (na to využijete nejlépe Gnuplot nebo Python) a zjistíte tak hodnoty kanálů pro fotopíky. Skutečné energie fotopíků zjistíte ze zdroje v poznámkách. Tento přepočet pak nařítujete lineární funkcí, která vám bude číslo kanálu přepočítávat na skutečnou energii. S touto funkcí pak všechna čísla kanálů ve všech datech přepočítejte na energie a výsledkem bude skutečné spektrum.

5 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 750 – 850 V. Doporučená hodnota je 750 V.
- **ad. DÚ2** Sestrojte lineární kalibrační křivku měřiče napětí, který neukazuje volty, ale cimirranty (zn. Ci). Pro váš experiment, ale potřebujete znát velikost napětí ve voltech.

³Toto číslo značí počet kanálů a klidně ho můžete změnit. Povoleny jsou hodnoty v mocninách 2 od 256 po 16384. Pokud zvolíte příliš velké množství kanálů, budou jednotlivé kanály moc malé a budete vidět velké fluktuace, pokud naopak zvolíte toto číslo moc malé, kanály budou příliš velké a hůře v spektru něco rozeznáte.

⁴Toto číslo značí, kolik kanálů bude na začátku ignorováno, je to proto, aby jsme vyřadili rentgenovské záření ze spektra.

⁵V případě, že se vám soubor nevytvoří, nebo nebude mít správný počet sloupců, zkontrolujte nastavení exportu: *File* → *Settings* → *Export* - Export Program by měl být C:\Program Files\Maestro\Translt.exe a parametr Arguments by měl být -spc \$(FullPath) -col 1 -ni -txt \$(FullPath).txt

Z pokusů víte, že vztah mezi cimirranty a volty je následující: Po přiložení zdroje napětí o hodnotě 100 V ukazuje měřič napětí 25 cimirrantů. Pro napětí 200 V ukazuje měřič 52 cimirrantů a pro 400 V ukazuje měřič 101 cimirrantů. Zdroj napětí má uvedenou 5% nepřesnost. Měřič napětí je náladový a tak je jeho chyba $\sqrt{2} + \text{datum}\%$, kde datum je číslo dne v měsíci Vašeho měření. Graf kalibrační křivky přineste na hodinu vytištěný, případně uložený na přenosném disku. Nezapomeňte na popisky os a další nezbytné součásti grafu.

- Každé měření/výsledek musí mít chybu!! Polohu píku určíte nejlépe fitem vybrané oblasti, např. funkcí „Gauss+konst.“ v programu Gnuplot. Nezapomeňte, že i parametry získané fitem mají svou chybu.
- Kalibrační křivka detektoru vyjadřuje závislost energie na čísle kanálu. Nejčastěji to bývá lineární závislost.
- Při určení neznámého zářiče můžete použít přehled gama zářičů uvedený zde: <https://www.cpp.edu/~pbsiegel/bio431/genergies.html>.

6 Otázky

1. Co je gama záření?
2. Co je spektrum?
3. Jakými způsoby může gama záření interagovat s hmotou?
4. Popište, jak vypadá spektrum gama záření a jaké jevy ovlivňují jeho tvar.
5. Jaký je rozdíl mezi jednokanálovým a mnohokanálovým analyzátozem?
6. Proč používáme ke stínění gama záření olovo?

Reference

- [1] *Wikipedia – Gamma ray*. [online]. 2020-02-07. Dostupné z: en.wikipedia.org/wiki/Gamma_ray
- [2] KNOLL, G. F. *Radiation Detection and Measurement*. 2000.