

IM-8

Badanie absorpcji promieniowania gamma w materiałach

I. Cel ćwiczenia

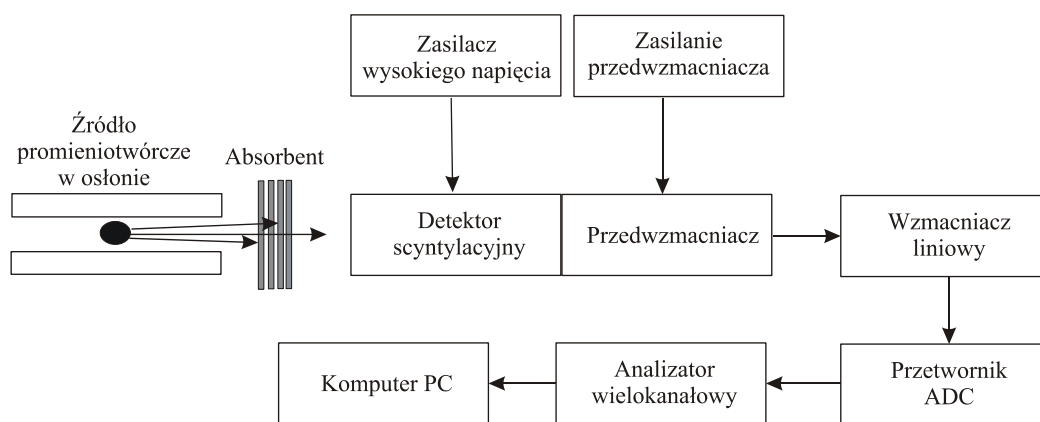
Celem ćwiczenia jest pomiar współczynników absorpcji promieniowania gamma dla metali (ołów, aluminium) w zależności od energii tego promieniowania.

II. Tematy do kolokwium

1. Zjawiska fizyczne występujące przy przechodzeniu promieniowania gamma przez materię.
2. Jak zmienia się natężenie skolimowanej wiązki promieniowania gamma wraz z grubością materiału przez który to promieniowanie przechodzi.
3. Metoda wyznaczenia współczynnika absorpcji promieniowania.
4. Zasada działania detektora scyntylacyjnego.

III. Aparatura pomiarowa

Dostępna aparatura pozwala mierzyć widma promieniowania gamma w zakresie od około 50 do 1500 keV. Budowa aparatury jest schematycznie przedstawiona poniżej.



Pomiędzy źródło promieniotwórcze a detektor można wsuwać płytki metalu tworzące absorbent o danej grubości, który częściowo zatrzymuje promieniowanie gamma. Pomiar natężenia promieniowania dla danej energii w zależności od grubości absorbenta pozwala wyznaczyć współczynnik absorpcji.

IV. Program ćwiczenia

1. Zaprezentować w ciągu 15 minut, co się wie na temat tego ćwiczenia.
2. Zapoznać się z aparaturą pomiarową. Należy zidentyfikować poszczególne elementy układu, sprawdzić czy, i jak, są ze sobą połączone.
3. Włączyć aparaturę, dokładnie według instrukcji.
4. Zapoznać się z programem Tukan do obsługi aparatury.

5. Umieścić źródło promieniowania ^{60}Co w osłonie ołowianej, dobrać wzmacnienie wzmacniacza liniowego i zmierzyć widmo promieniowania gamma.
6. Wykonać serie pomiarów widm dla różnej grubości absorbenta Pb i Al dla linii o energii 1333 keV z ^{60}Co . Z widm można na bieżąco podczas pomiarów wyliczać natężenie promieniowania, widma należy zapisywać do dalszej obróbki.
7. Wykonać podobne serie pomiarów ze źródłem ^{137}Cs (dla linii o energii 661 keV).

V. Opracowanie wyników

1. narysować zmierzone widma absorpcyjne dla 0, 2 oraz 4 cm warstwy absorbenta Pb dla ^{60}Co (na jednym wykresie) jako zależność liczby zliczeń od numeru kanału
2. ze wszystkich zmierzonych widm wyznaczyć natężenie promieniowania jako liczbę zliczeń pod maksimami pełnego pochłaniania
3. zrobić wykresy natężeń w zależności od grubości absorbenta dla wszystkich czterech przypadków, wyznaczyć współczynniki absorpcji
4. porównać zmierzone liniowe współczynniki absorpcji promieniowania gamma w ołowiu i aluminium z danymi tablicowymi
5. przeprowadzić oszacowanie dokładności pomiarów i dyskusję błędów
6. wyliczyć jak gruba warstwa ołowiu jest potrzebna do osłabienia natężenia promieniowania gamma np. 1000 razy.

VI. Literatura uzupełniająca w stosunku do instrukcji pożyczanej na pracowni

- [1] Z. Wróbel, A. Budziak, H. Hrynkiewicz, L. Jarczyk, "Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki jądrowej w pracowni studenckiej IFUJ", Skrypt Uczelniany UJ Nr 315
- [2] J. Araminowicz, K. Małuszyńska, M. Przytuła, Laboratorium Fizyki Jądrowej, PWN 1984
- [3] A. Strzałkowski, Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN, 1978

Materiały pomocnicze do ćwiczenia IM-8:

Oddziaływanie promieniowania gamma z materią.

Promieniowanie gamma to promieniowanie elektromagnetyczne powstające podczas rozpadu jąder promieniotwórczych. Energie tak powstałych fotonów mieszczą się w zakresie od kilku keV do kilku MeV. Przy przechodzeniu przez materię promieniowanie gamma oddziaływać może zarówno z elektronami jak i z jądrami. Spośród wielu możliwych procesów praktyczne znaczenie dla pochłaniania promieniowania mają trzy:

- zjawisko fotoelektryczne
- zjawisko Comptona
- tworzenie par elektron-pozyton

Zjawisko fotoelektryczne polega na przekazaniu energii fotonu elektronowi związanemu w atomie. W następstwie tego procesu elektron zostaje wybity z powłok atomowych a foton zostaje całkowicie pochłonięty.

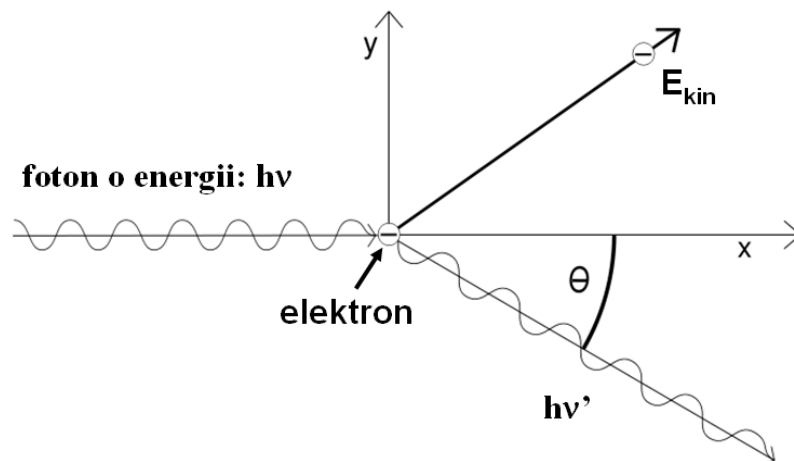
Prawdopodobieństwo zajścia zjawiska fotoelektrycznego zależy od liczby atomowej absorbenta Z i od energii kwantu gamma. Empirycznie można to opisać wzorem

$$\sigma_f = C Z^k / (h\nu)^n$$

gdzie C jest stałą, $k = 4 \div 4.6$, a $n = 1 \div 3.5$ w zależności od energii fotonu $h\nu$. Prawdopodobieństwo procesu fotoelektrycznego jest więc bardzo silnie zależne od absorbenta, bo aż z czwartą potęgą Z .

Przy niskich energiach fotonów, mniejszych niż energie wiązania w kolejnych powłokach elektronowych, krzywa przekroju czynnego na zjawisko fotoelektryczne w zależności od energii fotonu wykazuje nieciągłe skoki. Jest to widoczne na wykresie przekroju czynnego dla ołowiu.

Zjawisko Comptona to nieelastyczne rozpraszanie fotonów na swobodnych elektronach. W procesie takim część energii i pędu fotonu zostaje przekazana elektronowi a foton zmienia w tym procesie swój kierunek i energię. Z praw zachowania energii i pędu można wyliczyć jakie mogą być energie rozproszonych fotonów powstających w tym procesie i jakie są różniczkowe przekroje czynne. Ponieważ dla dużych energii fotonów można przyjąć że wszystkie elektrony w atomie są swobodne, całkowity przekrój czynny zależy liniowo od liczby elektronów w absorbencie, a więc liniowo od Z absorbenta.



Energia rozproszonego fotonu wynosi:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}, \quad \text{gdzie } \alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2}$$

natomiast energia kinetyczna elektronu odrzutu

$$E_{kin} = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}.$$

Z powyższych wzorów wynika, że największe przekaz energii od padającego fotonu do elektronu odrzutu następuje dla rozproszenie wstecznego ($\theta = 180^\circ$) i wynosi

$$\Delta E = h\nu - h\nu' = E_{kin}^{max} = h\nu \frac{2\alpha}{1 + \alpha}$$

Tworzenie par elektron-pozyton możliwe jest gdy kwant promieniowania gamma ma energię większą od podwójnej energii spoczynkowej elektronu ($m_0c^2 = 0.511 \text{ MeV}$) $h\nu > 2 \cdot 0.511 \text{ MeV} = 1.022 \text{ MeV}$. Proces tworzenia się takiej pary jest możliwy tylko w obecności jakiejś dodatkowej cząstki, w praktyce jądra atomowego. Powstały w tym procesie pozyton następnie anihiluje po spotkaniu z innym elektronem tworząc dwa kwanty gamma o energiach 0.511 MeV. Przekrój czynny na wytworzenie pary elektron-pozyton w pobliżu jądra o ładunku Z , dla fotonów poniżej 5 MeV zmienia się jak Z i rośnie wraz z energią fotonu.

Absorpcja promieniowania gamma

Przekrój czynny na usunięcie kwantu promieniowania gamma z wiązki jest sumą przekrojów czynnych trzech powyżej opisanych procesów. W procesach tych foton jest w całości usuwany z wiązki. Nawet gdy w procesie Comptona powstaje nowy foton to jego kierunek jest już inny.

Jeżeli mamy absorbent o małej grubości dx i pada na niego n fotonów to zaabsorbowanych zostaje dn fotonów

$$dn = -\mu_0 n dx$$

gdzie μ_0 jest liniowym współczynnikiem absorpcji.

Rozwiązując to równanie różniczkowe otrzymuje się prawo absorpcji dla fotonów

$$n = n_0 \exp(-\mu_0 x)$$

gdzie

n_0 – liczba fotonów padających na absorbent

n – liczba fotonów które przechodzą na wylot

x – grubość absorbenta.

Współczynnik μ_0 jest związany z przekrojem czynnym zależnością

$$\mu_0 = N \sigma_0$$

gdzie N jest liczbą atomów absorbenta na jednostkę objętości.

Czasami w tablicach podawany jest masowy współczynnik absorpcji μ_m związany z liniowym współczynnikiem zależności

$$\mu_m = \mu_0 / \rho$$

gdzie ρ jest gęstością absorbenta.

Metoda wyznaczenia liniowego współczynnika absorpcji promieniowania gamma.

Aby wyznaczyć μ_0 należy zmierzyć zależność liczby fotonów przechodzących przez absorbent n w funkcji jego grubości x . Powinna to być zależność eksponencjalna. Jeżeli zrobi się wykres $\ln(n)$ w funkcji x to powinno otrzymać się prostą o nachyleniu $-\mu_0$.

$$\ln(n) = \ln(n_0) - \mu_0 x.$$

To musi być logarytm naturalny, a nie dziesiętny !!! Dopasowanie prostej metodą najmniejszych kwadratów (regresja liniowa) daje wartość μ_0 .

Zasada działania aparatury pomiarowej

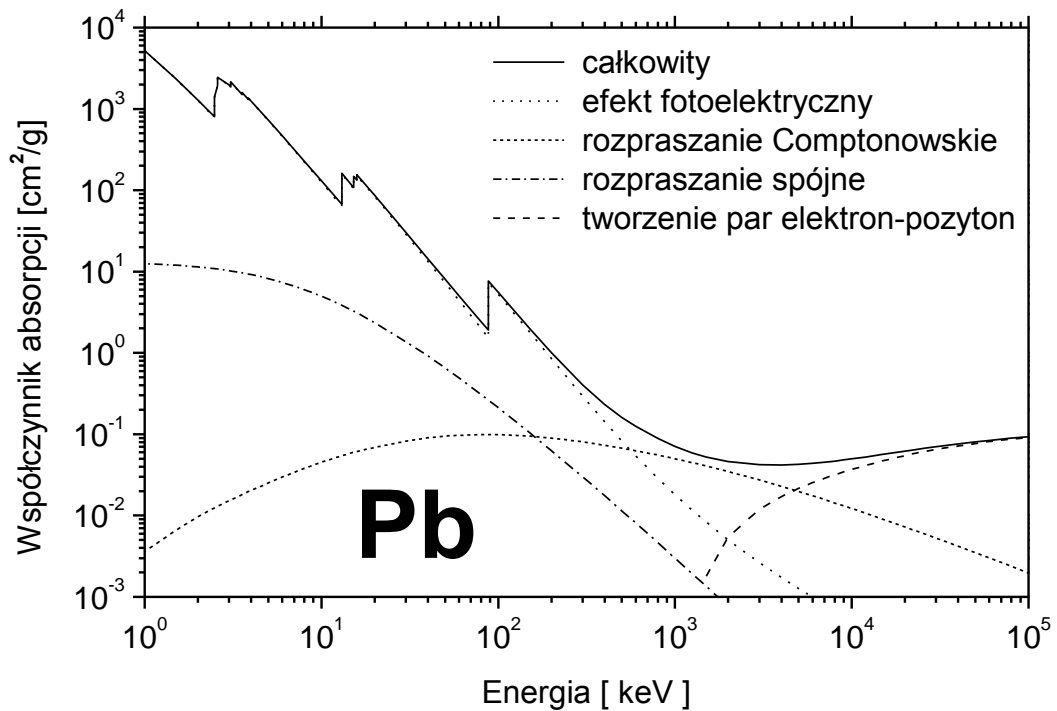
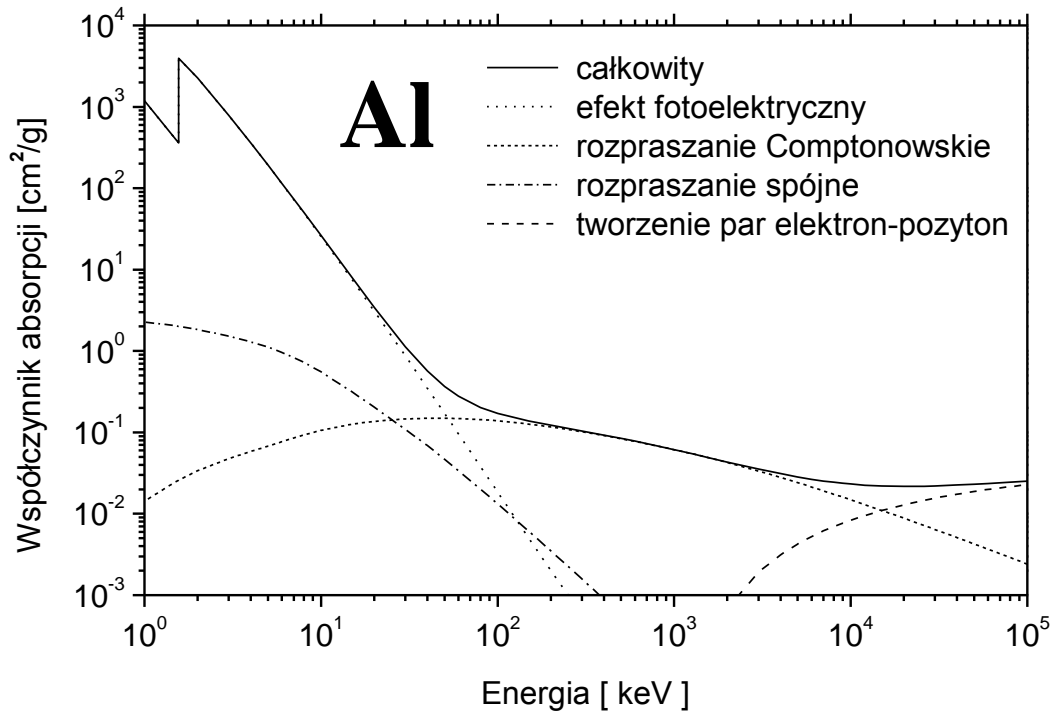
Fotony promieniowania gamma rejestrowane są przez **licznik scyntylacyjny**. Składa się on z kryształu NaI i lampy elektronowej zwanej fotopowielaczem. Kryształ NaI należy do grupy substancji, które świecą pod wpływem promieniowania jonizującego (scyntylatory). Powstające w kryształach promieniowanie świetlne odbija się od obudowy kryształu i wychodzi przez jedyną przezroczystą ściankę, za którą umocowany jest fotopowielacz.

W efekcie fotoelektrycznym z katody fotopowielacza wybijane są elektrony, które padają na kolejne elektrody tworząc lawinowe wyładowanie. W ten sposób powstaje impuls prądu elektrycznego. Do pracy fotopowielacza potrzebne jest jego zasilanie z **zasilacza wysokiego napięcia**, bo kolejne elektrody w fotopowielaczu muszą być pod coraz to wyższym napięciem. Wartość tego napięcia zależy od typu fotopowielacza i jest podana na obudowie detektora. Taką wartość należy ustawić na zasilaczu wysokiego napięcia.

Im wyższa jest energia promieniowania gamma, która została zatrzymana w kryształach detektora, tym większa jest wysokość impulsu napięcia powstającego na wyjściu fotopowielacza.

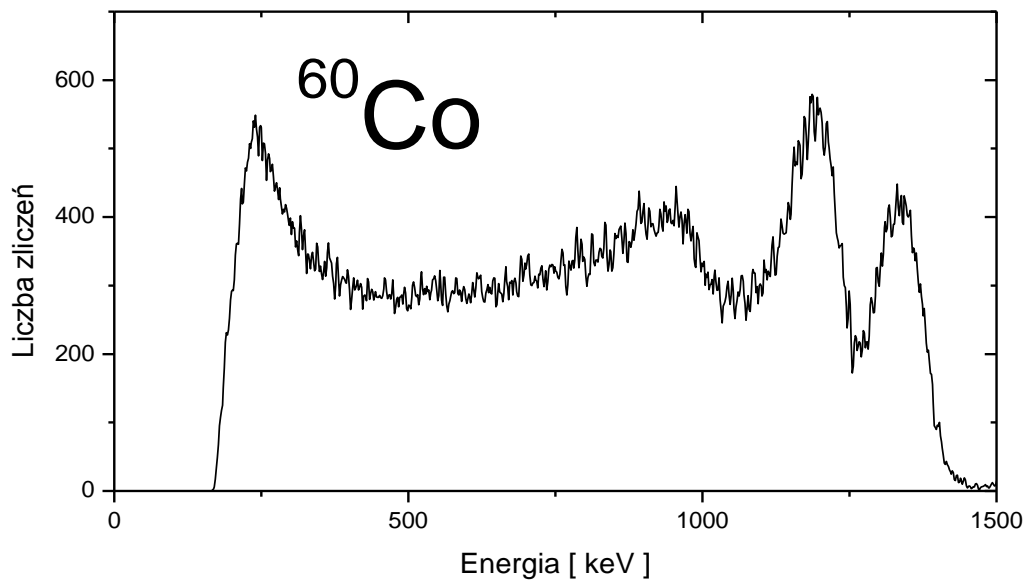
Sygnal z fotopowielacza jest najpierw wzmacniany w przedwzmacniaczu, a następnie przy pomocy **wzmacniacza liniowego** (Signal Filter Amplifier). Impulsy wychodzące z detektora mają około -0.1V amplitudy i czas trwania rzędu kilku μs . Wzmacniacz zmienia je na impulsy dodatnie i wzmacnia do amplitudy rzędu $+8\text{V}$. Stałą wzmocnienia można regulować w sposób ciągły i skokowy. Amplituda impulsów wychodzących ze wzmacniacza nie powinna przekraczać 10V . Dalej sygnał podawany jest do układu **ADC** (Analog Digital Converter) w którym wykonywany jest pomiar amplitudy przychodzących impulsów. Cały zakres od 0 do 10V podzielony jest na 1024 kanały, i każdemu kanałowi odpowiada kolejny zakres napięć o szerokości $10/1024\text{V}$. Układ elektroniczny dla każdego kanału pamięta liczbę impulsów, które do niego trafiły. W ten sposób tworzony jest histogram: liczba zliczeń w funkcji numeru kanału. Jest to widmo, czyli zależność natężenia promieniowania w funkcji energii tego promieniowania.

Układ ADC jest poprzez sterownik kasy CAMAC połączony z komputerem. Program komputerowy Tukan pozwala odczytać zmierzone widmo z analizatora, pokazać je na ekranie czy zapisać w postaci kolumny liczb do pliku.

Wykresy zależności współczynników absorpcji dla Al i Pb z podziałem na poszczególne procesy

Schematy rozpadów ^{60}Co i ^{137}Cs

Podczas rozpadu ^{60}Co emitowane są dwa kwanty gamma o energiach **1171** oraz **1333 keV** i takich samych natężeniach. Dwa piki na wykresie poniżej po prawej stronie to maksima pełnego pochłaniania (tzw. fotolinie). Cała reszta zliczeń (zliczenia w zakresie do ok. 1000 keV) jest wynikiem rozprośnień Comptonowskich w detektorze, źródle promieniotwórczym oraz w kolimatorze. Spadek liczby zliczeń dla energii poniżej około 200 keV jest sztuczny, bo układ ADC jest ustawiony w ten sposób żeby nie akceptował impulsów mniejszych od zadanego progu.



Podczas rozpadu ^{137}Cs emitowany jest kwant gamma o energii **661 keV**.

