

## J6 - Pomiar absorpcji promieniowania $\gamma$

Celem ćwiczenia jest pomiar współczynnika osłabienia promieniowania  $\gamma$  w różnych absorbentach przy użyciu detektora scyntylacyjnego.

### Materiał, który należy opanować do kolokwium wstępnego

#### 1. Oddziaływanie kwantów $\gamma$ z materią:

- efekt fotoelektryczny,
- zjawisko Comptona,
- tworzenie par.

Porównanie przebiegu przekrojów czynnych na te procesy w funkcji energii promieniowania  $\gamma$  dla różnych ośrodków (wpływ energii wiązania elektronów w atomie). Czy energia kwantów  $\gamma$  rozproszonych (i obserwowanych) pod kątem  $0^\circ$  ulega zmianie przy przejściu przez absorbent? A ich ilość? Co to jest współczynnik osłabienia?

#### 2. Spektrometr scyntylacyjny:

- Budowa i działanie: procesy zachodzące w scyntylatorze przy rejestracji kwantów  $\gamma$ . Rola i działanie fotopowielacza.
- Co mierzy detektor scyntylacyjny: energię promieniowania  $\gamma$  czy energię elektronów wtórnych?
- Jaką energię w detektorze zostawiają kwanty  $\gamma$  w procesie fotoefektu i rozproszenia komptonowskiego? Jaka jest maksymalna energia zarejestrowana na drodze efektu Comptona ("krawędź Comptona")?
- Jak wydajność detektora scyntylacyjnego zależy od energii kwantów  $\gamma$ ?
- Ogólne wiadomości o działaniu wzmacniacza i wielokanałowego analizatora amplitud. Co to jest czas martwy?

#### 3. Interpretacja widma impulsów: co widać na wyjściu spektrometru przy rejestracji monoenergetycznego źródła $\gamma$ ?

#### 4. Jak obliczyć błąd statystyczny ilości zliczeń?

### Przebieg pomiarów

- Zapoznanie się z układem pomiarowym i zrozumienie jego działania (warto zrobić rysunek!).
- Podanie odpowiedniego napięcia (**Uwaga!** Sprawdź instrukcję stanowiska i skonsultuj się z prowadzącym) i obejrzenie impulsów na oscyloskopie.
- Dobór wzmacnienia i kalibracja energetyczna przy użyciu źródeł kalibracyjnych.
- Ustalenie odległości detektora od źródła.
- Pomiar tła.
- Pomiar absorpcji promieniowania  $\gamma$  z ustalonego źródła dla różnych materiałów o różnej grubości (aluminium, miedź, żelazo, ołów). Pomiar grubości użytych absorbentów suwmiarką.

**Uwaga:** należy zapisywać na dysku wszystkie mierzone widma!

## **Opis**

Opis powinien zawierać następujące elementy:

- Streszczenie.
- Krótki wstęp prezentujący ideę oraz cel pomiarów.
- Schemat układu doświadczalnego.
- Opis warunków pomiarowych (ew. ich optymalizacji).
- Opis samych pomiarów oraz ich wyniki (w postaci tabel i wykresów).
- Analiza danych.
- Wyniki i ich dyskusja. Wyznaczone współczynniki osłabienia należy koniecznie porównać z wartościami tablicowymi.
- Krótkie podsumowanie.

Należy unikać opisu zasad działania aparatury - znajomość ta będzie sprawdzana w trakcie kolokwium. Prosimy nie przepisywać informacji z instrukcji. Zbędne jest wyprowadzanie jakichkolwiek wzorów (z wyjątkiem ew. własnych).

## **LITERATURA**

1. A.Strzałkowski „Wstęp do fizyki jądra atomowego”.
2. J.England „Metody doświadczalne fizyki jądrowej”.
3. J.Araminowicz i in. „Laboratorium fizyki jądrowej”.
4. W.R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments".
5. G.F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement".

## Informacje dodatkowe

### Detekcja promieniowania gamma

Warunkiem zarejestrowania promieniowania gamma jest jego oddziaływanie z materiałem detektora. Promieniowanie gamma może oddziaływać zarówno z elektronami jak i z jądrami i polami elektrycznymi elektronów i jąder atomowych. Oddziaływania te mogą prowadzić do całkowitej absorpcji lub też elastycznego bądź nieelastycznego rozpraszania kwantów promieniowania gamma. W praktyce znaczenie mają trzy zjawiska:

**Zjawisko fotoelektryczne** – w procesie tym kwant gamma oddziałuje z elektronem związanym w atomie ośrodka i przekazuje mu całą swoją energię. Kwant gamma zostaje całkowicie zaabsorbowany natomiast elektron uzyskuje energię równą:

$$E_e = E_\gamma - E_B \quad (1)$$

gdzie

$E_B$  – energia wiązania elektronu na orbicie atomowej, z której został wybity,  
zwykle  $E_B \ll E_\gamma$ .

**Efekt Comptona** – w procesie tym kwant gamma ulega nieelastycznemu rozproszeniu na swobodnym (słabo związanym elektronie) i przekazuje mu część swojej energii. Energia kinetyczna przyspieszonego elektronu określona jest wzorem wynikającym z zasady zachowania energii i pędu:

$$E'_e = E_\gamma \frac{\alpha(1 - \cos \theta)}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

gdzie

$\theta$  - kąt pod jakim nastąpiło rozproszenie kwantu gamma,  
 $\alpha = E_\gamma / m_e c^2$ .

Jak wynika ze wzoru (2), energia elektronu zależy od kąta pod jakim nastąpiło rozproszenie kwantu gamma i przyjmuje wartości od 0 - dla kątów rozproszenia równych zero do wartości maksymalnej - dla kwantów gamma rozproszonych do tyłu ( $\theta = 180^\circ$ ).

**Zjawisko kreacji par** – w procesie tym kwant gamma zamienia się na parę  $e^+e^-$  (elektron-pozyton). Proces ten może zachodzić jedynie dla kwantów gamma o energii większej niż  $2m_e c^2 = 1022 \text{ keV}$ . Łączna energia kinetyczna wytworzonej pary  $e^+e^-$  wynosi:

$$E_{e^+} + E_{e^-} = E_\gamma - 2m_e c^2 \quad (3)$$

Konwersja kwantu gamma na parę  $e^+e^-$  może zachodzić jedynie w polu jądra atomowego (rzadziej elektronu), gdyż tylko wtedy możliwe jest spełnienie zasady zachowania energii i pędu.

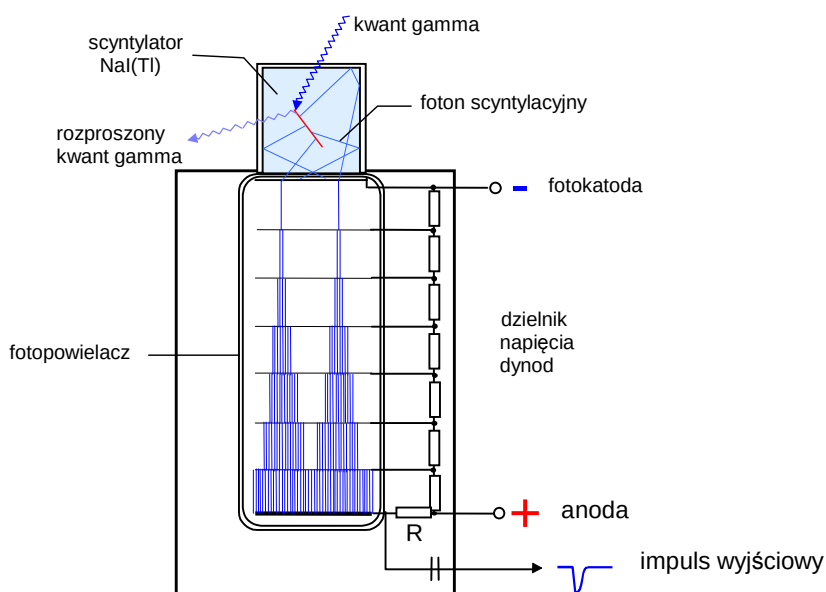
Prawdopodobieństwo zajścia każdego z wymienionych procesów silnie zależy od energii kwantu gamma oraz liczby atomowej materiału ośrodka.

## Detektor scyntylacyjny

Rysunek 2 przedstawia schemat budowy detektora, w którym jako scyntylator zastosowano kryształ NaI(Tl) (jodek sodu aktywowany talem). Kryształ NaI(Tl) jest połączony optycznie z oknem wejściowym tzw. fotopowielaczem.

Promieniowanie gamma oddziałuje z kryształem NaI(Tl) poprzez proces fotoelektryczny, rozproszenie komptonowskie lub konwersję na parę elektron-pozyton. Elektrony przyspieszone w wyniku zajścia któregoś z tych procesów poruszają się w kryształcie i tracą swoją energię powodując jonizację i wzbudzenia atomów ośrodka. Procesom deekscytacji tych wzbudzeń towarzyszy emisja kwantów światła. W scyntylatorach używanych do celów spektrometrycznych (tzn. do pomiaru energii promieniowania) całkowita liczba wyemitowanych fotonów jest proporcjonalna do energii początkowej elektronu. Strumień fotonów scyntylacyjnych jest rejestrowany przez fotopowielacz.

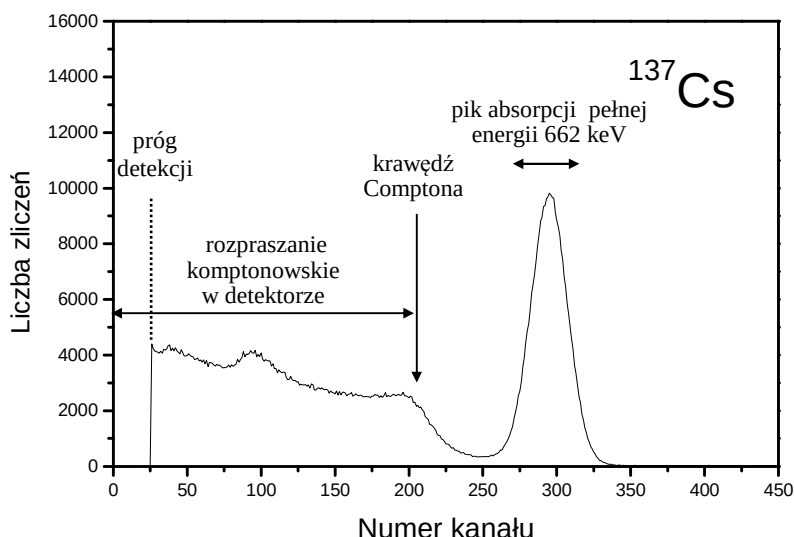
Fotopowielacz jest to lampa elektronowa, której katoda wykonana jest z materiału światłoczułego. Między katodą i anodą fotopowielacza znajduje się układ kilku odpowiednio ukształtowanych elektrod zwanych dynodami. Między kolejnymi elektrodami przy pomocy odpowiednio skonstruowanego dzielnika napięcia wytwarzane jest pole elektryczne. Fotony docierające do fotokatody wybijają elektrony (efekt fotoelektryczny), które są przyspieszane w kierunku pierwszej dynody. Elektron uderzający w dynodę powoduje wybite 3-4 elektronów wtórnych, które są przyspieszane w kierunku kolejnej dynody itd. Proces ten prowadzi do szybkiego powielenia początkowej liczby elektronów i dzięki temu w fotopowielaczach osiąga się wzmocnienia rzędu  $10^5$ - $10^8$ . Amplituda sygnału wyjściowego fotopowielacza jest proporcjonalna do energii zaabsorbowanej przez kryształ scyntylatora. Zwróćmy uwagę, że energia ta jest absorbowana za pośrednictwem elektronów przyspieszanych w wyniku oddziaływania kwantów gamma z materiałem scyntylatora.



Rys.2 Schemat budowy detektora scyntylacyjnego.

Rysunek 3 przedstawia widmo (rozkład) amplitud sygnałów z detektora scyntylacyjnego zarejestrowane podczas pomiaru źródła  $^{137}\text{Cs}$  emitującego kwanty gamma o energii 662 keV. Pik, którego środek leży w kanale  $\sim 300$  odpowiada pełnej absorpcji promieniowania gamma o energii 662 keV w kryształcie NaI(Tl). Jest to możliwe np. wskutek zajścia zjawiska fotoelektrycznego w materiale scyntylatora.

Przedział amplitud rozciągający się od kanału 0 do tzw. krawędzi Comptona odpowiada zdarzeniom, w których jedynie część energii kwantu gamma została zaabsorbowana w kryształcie scyntylatora. Główny wkład do tej części widma daje efekt Comptona, w którym kwant gamma przekazuje część swojej energii jednemu z elektronów materiału scyntylatora natomiast kwant rozproszony ucieka z kryształu. Energia jaką uzyskuje elektron zależy od wartości kąta pod jakim nastąpiło rozproszenie. Krawędź Comptona odpowiada przypadkom, w których w procesie rozpraszania kwant gamma przekazał elektronowi w kryształcie scyntylatora maksymalną energię (rozproszenie pod kątem  $\theta = 180^\circ$ , zobacz wzór (2)).



Rys. 3 Widmo amplitud sygnałów z detektora NaI(Tl) zarejestrowane podczas pomiaru promieniowania gamma emitowanego ze źródła  $^{137}\text{Cs}$ .

### Podstawowe wielkości określające własności układu spektrometrycznego

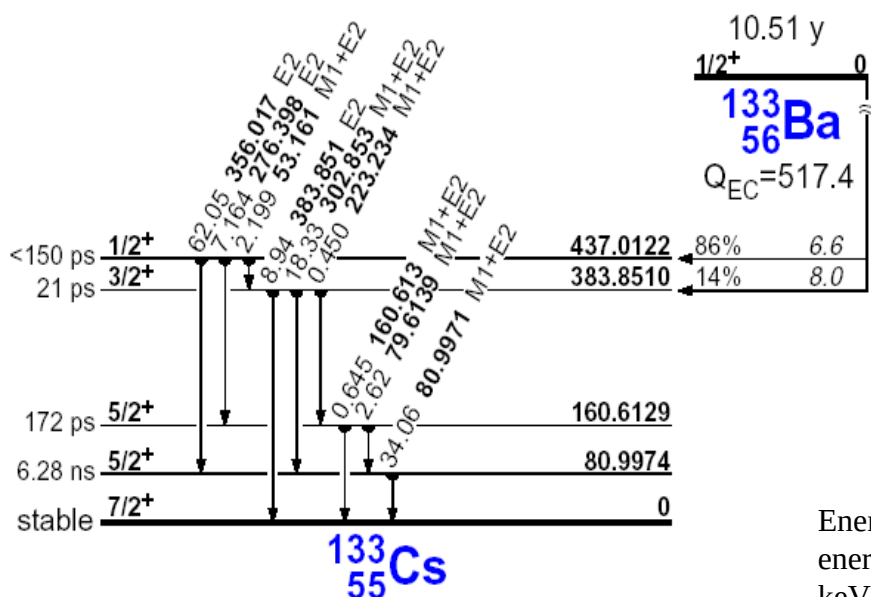
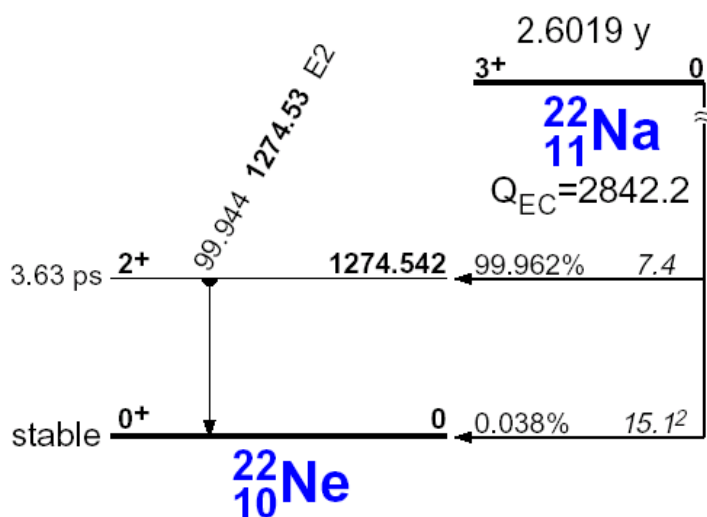
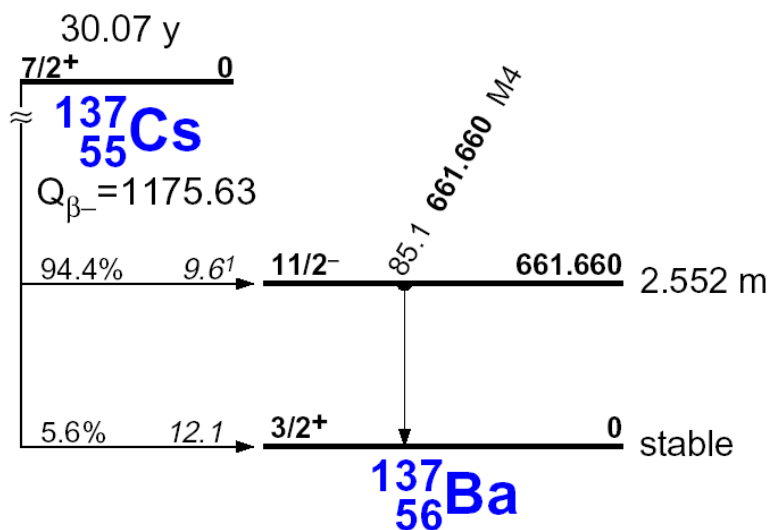
- 1) Energetyczna zdolność rozdzielcza określająca zdolność układu detekcyjnego do obserwacji przejść gamma o bardzo bliskich energiach. W przypadku detektorów z kryształem NaI(Tl) energetyczną zdolność rozdzielczą przyjęto określać mierząc, w połowie wysokości, całkowitą szerokość piku odpowiadającego rejestracji promieniowania gamma o energii 662 keV, emitowanego ze źródła  $^{137}\text{Cs}$ . Dla spektrometrów NaI(Tl) energetyczna zdolność rozdzielcza, określona jako stosunek szerokości połówkowej piku do jego położenia, wynosi 6-8 %.
- 2) Wydajność rejestracji promieniowania gamma. Z praktycznego punktu widzenia interesująca jest wydajność rejestracji pełnej energii emitowanych kwantów gamma.

Wielkość tę definiuje się jako stosunek liczby zliczeń zarejestrowanych w pikcie odpowiadającym rejestracji pełnej energii kwantu gamma do całkowitej liczby kwantów gamma wyemitowanych ze źródła w czasie trwania pomiaru. Wydajność spektrometru silnie zależy od energii rejestrowanych kwantów oraz od geometrii pomiaru (kształtu i położenia źródła względem kryształu detektora).

- 3) Kalibracja energetyczna określa związek pomiędzy energią kwantów gamma a amplitudą rejestrowanych sygnałów. W przypadku kalibracji liniowej zależność tę opisuje się jako  $E_{\gamma} = a + bk$ , gdzie  $k$  – numer kanału,  $a$ ,  $b$  – współczynniki kalibracyjne.

Kalibrację energetyczną oraz kalibrację wydajnościową spektrometru wykonuje się wykorzystując źródła kalibracyjne o bardzo dobrze znanych energiach kwantów gamma i ich aktywnościach.

## Schematy rozpadu źródeł kalibracyjnych



Energie wzbudzenia poziomów i energie przejść gamma podano w keV.