## Badanie próbek środowiskowych

Celem ćwiczenia jest pomiar promieniowania gamma emitowanego z próbki trynitytu oraz identyfikacja i określenie aktywności izotopów w niej zawartych. Trynityt to szkliwo powstałe z ziaren piasku stopionych pod wpływem wysokiej temperatury wytworzonej w wybuchu jądrowym. Badana próbka pochodzi z miejsca przeprowadzenia pierwszego testu bomby jądrowej oznaczonego kryptonimem "Trynity test", przeprowadzonego w 16 lipca 1945 r. na pustyni Jornada del Muerto w Nowym Meksyku w ramach Projektu Manhattan. Zdetonowano wtedy bombę ("Gadget") typu implozyjnego zwierającą 6.19 kg<sup>239</sup>Pu.

### Przygotowanie do kolokwium:

- 1) Oddziaływanie kwantów gamma z materią [1] 1.11, 1.113, 1.114, 1.143, [2]
  - a. efekt fotoelektryczny,
  - b. efekt Comptona,
  - c. tworzenie par, anihilacja pozytonów,
  - d. zależność przekroju czynnego na absorpcję promieniowania (współczynnika absorpcji) od energii promieniowania oraz liczby atomowej ośrodka.
- 2) Interpretacja schematów rozpadu źródeł kalibracyjnych [2]
- 3) Detekcja promieniowania jądrowego za pomocą detektora scyntylacyjnego.
- 4) Budowa i zasada działania podstawowych układów elektronicznych: wzmacniacz, dyskryminator, analizator wielokanałowy amplitudy [1] 1.16, [5] 2.3
- 5) Statystyka pomiarów przy rejestracji promieniowania jądrowego. Teoria błędów przy rejestracji promieniowania jądrowego [1] 1.171, 1.172
- 6) Minimalna obserwowalna aktywność (MDA).

### Wykonanie zadania:

- 1) Zapoznanie się z układem pomiarowym
- 2) Ustalenie warunków pracy układu: dobór wzmocnienia, optymalizacja zdolność rozdzielczej.
- Pomiar widm promieniowania gamma ze źródeł <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>22</sup>Na, <sup>241</sup>Am. Pomiary należy wykonać w dwóch geometriach: ze źródłami umieszczonymi wewnątrz i na zewnątrz kryształu.
- 4) Kalibracja energetyczna układu.
- 5) Wyznaczenie wydajności detektora dla promieniowania gamma emitowanego ze źródeł <sup>137</sup>Cs i <sup>241</sup>Am.
- 6) Pomiar promieniowani gamma emitowanego z próbki trynitytu.
- 7) Pomiar promieniowania tła.
- 8) Identyfikacja przejść gamma, wyznaczenie ich energii, identyfikacja izotopów i określenie ich aktywności.
- 9) Wyznaczenie minimalnej obserwowalnej aktywności układu.

### Literatura:

- [1] A. Strzałkowski "Wstęp do fizyki jądra atomowego", wyd. III
- [2] Załącznik do Instrukcji

[3] Chart of Nuclides www.nndc.bnl.gov/chart
[4] T. Mayer-Kuckuk "Fizyka jądrowa"PWN 1987 rozdz. 5.1
[5] J.B. England "Metody doświadczalne w fizyce jądrowej" PWN 1980
[6] E. Skrzypczak, Z. Szefliński, Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych, PWN 1995

## Załącznik

#### Oddziaływanie kwantów gamma z materią

Warunkiem zarejestrowania promieniowanie 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:

$$E_e = E_\gamma - E_B \tag{1}$$

gdzie

 $E_{\rm B}$  – energia wiązania elektronu na orbicie atomowej, z której został wybity. Wybity elektron porusza się w materiale detektora i traci energię wskutek wzbudzeń i jonizacji atomów ośrodka. Dziura w powłoce atomu zjonizowanego w wyniku procesu fotoelektrycznego zostaje zapełniona przez elektron z wyższej powłoki. Temu przejściu towarzyszy emisja kwantu charakterystycznego promieniowania X lub emisja elektronu Auger'a. Energia tych cząstek zostaje zaabsorbowana w materiale detektora. Wszystkie te procesy zachodzą bardzo szybko i z punktu widzenia układu detekcyjnego można je traktować jak równoczesne.

Przekrój czynny na efekt fotoelektryczny silnie zależy od liczby atomowej ośrodka oraz energii kwantu gamma:

$$\sigma_f \propto \frac{Z^{4.5}}{E_{\gamma}^3} \tag{2}$$

Na rysunku 1 pokazano zależność przekroju czynnego na efekt fotoelektryczny od energii kwantów gamma oddziałujących z atomami jodu obecne w krysztale NaI(Tl).

**Efekt Comptona** – w procesie tym kwant gamma ulega rozproszeniu na swobodnym (słabo związanym elektronie) i przekazuje mu część swojej energii.



Energia kinetyczna przyspieszonego elektronu określona jest zależnością wynikającą z zasady zachowania energii i pędu:

$$E'_{e} = E_{\gamma} \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$
(3)

gdzie

 $\theta$  - kąt pod jakim nastąpiło rozproszenie kwantu gamma,

$$\alpha = E_{\gamma} / m_e c^2.$$

Jak wynika ze wzoru (3), 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 ( $\theta = 180^{\circ}$ ).

Przyspieszony elektron porusza się w materiale detektora i traci energię wskutek wzbudzeń i jonizacji atomów ośrodka. Rozproszony kwant gamma może opuścić kryształ lub ponownie oddziaływać z materiałem detektora.

Zależność przekroju czynnego na efekt Comptona od liczby atomowej ośrodka oraz energii kwantu gamma (dla  $E_{\gamma} > 511$  keV) opisuje wyrażenie:

$$\sigma_C \propto Z \frac{\ln E_{\gamma}}{E_{\gamma}} \tag{4}$$

Na rysunku 1 pokazano zależność przekroju czynnego na efekt Comptona od energii kwantów gamma oddziałujących z elektronami atomów jodu.

**Zjawisko kreacji par** – w procesie tym kwant gamma zamienia się na parę e+e- (eletkronpozyton). Proces ten może zachodzić jedynie dla kwantów gamma o energii większej niż  $2m_ec^2 = 1022 \text{ keV}$  i zachodzi w polu jądra atomowego (rzadziej elektronu), gdyż tylko wtedy możliwe jest spełnienie zasady zachowania energii i pędu.

Łączna energia kinetyczna wytworzonej pary e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> wynosi:

$$E_{e+} + E_{e-} = E_{\gamma} - 2m_e c^2 \tag{5}$$

Elektron i pozyton powstałe w procesie kreacji par poruszają się w materiale detektora i tracą swoją początkową energię kinetyczną. Zatrzymany pozyton tworzy z napotkanym elektronem ośrodka pozytonium, które anihiluje w czasie ~125 ps emitując dwa kwanty gamma o energii 511 keV każdy. Jeśli energia kinetyczna elektronu, energia kinetyczna pozytonu oraz energia obydwu anihilacyjnych kwantów gamma zostaną zaabsorbowane w materiale detektora to zarejestruje on całkowitą energię padającego kwantu gamma. Może się jednak zdarzyć, że jeden lub obydwa kwanty anihilacyjne uciekną z detektora nie pozostawiając w nim żadnej energii. Wtedy detektor zarejestruje energię równą odpowiednio  $E_{\gamma}$ - 511 keV lub  $E_{\gamma}$ -2\*511 keV. W widmie impulsów z detektora oświetlonego kwantami gamma o energii większej niż 1022 keV pojawią się trzy piki: pik pełnej absorpcji promieniowania  $E_{\gamma}$ , tzw. pik pojedynczej ucieczki ( $E_{\gamma}$ -511 keV) oraz pik podwójnej ucieczki ( $E_{\gamma}$ -2\*511 keV).

Rysunek 1 pokazuje zależność energetyczną przekroju czynnego na zjawisko kreacji par dla kwantów gamma padających na atomy jodu. Przekrój czynny na efekt kreacji par rośnie z kwadratem liczby atomowej ośrodka:  $\sigma_{pair} \propto Z^2$ 



Rysunek 1 Zależność energetyczna przekrojów czynnych na oddziaływanie kwantów gamma z atomami jodu.

### Detektor scyntylacyjny

W ćwiczeniu J16 do detekcji promieniowania gamma wykorzystujemy scyntylator NaI(Tl). (jodek sodu aktywowany talem). Mechanizm scyntylacji w tym krysztale nieorganicznym można wyjaśnić odwołując się do modelu pasmowego struktury elektronowej kryształów.

Czysty kryształ NaI jest izolatorem z całkowicie zapełnionym pasmem walencyjnym oddzielonym od całkowicie pustego pasma przewodnictwa przerwą energetyczną o szerokości 3.9 eV. Cząstka naładowana (np. elektron przyspieszony w wyniku oddziaływania z kwantem gamma) przechodząca przez kryształ wzbudza elektrony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Elektrony z pasma przewodnictwa mogą rekombinować z dziurą w paśmie walencyjnym. Procesowi temu towarzyszy emisja kwantów światła o energii 3.9 eV. Światło to jest jednak silnie pochłaniane w krysztale i czysty kryształ NaI charakteryzuje się bardzo małą wydajnością scyntylacji.

Własności scyntylacyjne kryształu NaI poprawia się domieszkując go atomami talu w ilości ok. 0.1 – 0.5%. Obecność atomów talu powoduje pojawienie się w obszarze przerwy energetycznej stanów, które mogą być zapełniane przez elektrony z pasma przewodnictwa. W krysztale NaI(Tl) przejście elektronu z pasma przewodnictwa następuje poprzez przejście bezradiacyjne do jednego ze stanów wzbudzonych atomów talu, który rozpada się do stanu podstawowego emitując kwanty światła o energii 3 eV (420 nm). Kryształ NaI(Tl) jest przezroczysty dla światła o tej długości fali, bowiem ma ono zbyt małą energię aby wywołać przejście elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Dodatkowo, długość fali emitowanego światła leży w zakresie maksymalnej czułości fotokatody fotopowielaczy wykorzystywanych do rejestracji światła.

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. fotopowielacza.

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 kryształe i tracą swoją energię i pobudzają kryształ do scyntylacji (świecenia). 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 wybicie 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<sup>5</sup>-10<sup>8</sup>. Amplituda sygnału wyjściowego fotopowielacza jest proporcjonalna do energii zaabsorbowanej przez kryształ scyntylatora. Zwróćmy uwagę, że energia ta jest absorbowana za pośrednictwem elektronów



Rysunek. 2 Schemat budowy detektora scyntylacyjnego.

Rysunek 3 przedstawia widmo (rozkład) amplitud sygnałów z detektora scyntylacyjnego zarejestrowane podczas pomiaru źródła <sup>137</sup>Cs emitującego kwanty gamma o energii 662 keV. Pik, którego środek leży w kanale ~300 odpowiada pełnej absorpcji promieniowania gamma o energii 662 keV w krysztale 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 krysztale 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 krysztale scyntylatora maksymalną energię (rozproszenie pod kątem  $\theta = 180^\circ$ , zobacz wzór (3) ).



Rysunek 3 Widmo amplitud sygnałów z detektora NaI(Tl) zarejestrowane podczas pomiaru promieniowania gamma emitowanego ze źródła <sup>137</sup>Cs. Sygnały o amplitudach mniejszych niż 25 kanałów znajdują się poniżej progu akceptacji układu elektronicznego i nie są rejestrowane.

### Podstawowe wielkości określające własności układu spektrometrycznego

- Energetyczna zdolność rozdzielcza określająca zdolność układu detekcyjnego do obserwacji przejść gamma o bardzo bliskich energiach. W przypadku detektorów scyntylacyjnych energetyczną zdolność rozdzielczą przyjęto określać podając stosunek szerokości połówkowej piku 662 keV (<sup>137</sup>Cs) do jego położenia.
- 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 piku odpowiadającym rejestracji pełnej energii kwantu gamma do całkowitej liczby kwantów gamma wyemitowanych ze źródła w czasie trwania pomiaru:

$$\varepsilon(E_{\gamma}) = \frac{N_{rej}}{N_{emit}} = \frac{N_{rej}}{A \cdot b_{\gamma} \cdot t_{live}}$$

gdzie:  $N_{rej}$  – liczba zliczeń zrejestrowana w piku pełnej energii  $E_{\gamma}$ , A – aktywność źródła w chwili pomiaru,  $b_{\gamma}$  – prawdopodobieństwo emisji kwantu gamma w rozpadzie,  $t_{live}$  – czas żywy pomiaru.

Wydajność detektorów promieniowania gamma 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, czasach życia, stosunkach rozgałęzień i aktywnościach.

4) Minimalna obserwowalna aktywność (Minimum Detectable Activity - MDA) Minimalna obserwowalna aktywność to najmniejsza wielkość aktywności próbki, która może być zaobserwowana w danym układzie pomiarowym, w określonych warunkach tła w zadanym czasie trwania pomiaru.

Wartość tę opisuje tzw. równanie Curie, które określa wielkość MDA przy założeniu tego, że:

- a) prawdopodobieństwo fałszywego wykluczenia aktywno jest mniejsze niż 5%,
- b) prawdopodobieństwo fałszywego potwierdzenia aktywności jest mniejsze niż 5%.

Przy tych założeniach wzór Curie ma postać:

$$MDA = \frac{4.65\sqrt{n_B \cdot t} + 2.71}{\varepsilon(E_{\gamma}) \cdot b_{\gamma} \cdot t}$$

 $n_{\rm B}$  - szybkość zliczania tła (w obszarze piku *i* ) (l. zliczeń/s<sup>-1</sup>)  $\epsilon(E_{\gamma})$  - bezwzględna wydajność rejestracji promieniowania  $E_{\gamma}$   $b_{\gamma}$  - współczynnik rozgałęzienia dla przejścia  $\gamma$ t - czas trwania pomiaru aktywności

# Schematy rozpadu źródeł kalibracyjnych



Energie wzbudzenia poziomów i energie przejść gamma podano w keV.