

Ćwiczenie 13

Spektrometr gamma

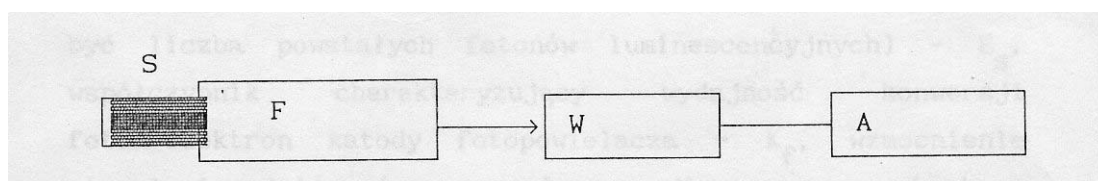


Student winien wykazać się znajomością:

1. Promieniowanie gamma, jego własności i oddziaływanie z materią (np. fotoefekt, efekt Comptona, zjawisko tworzenia par).
2. Licznik scyntylacyjny – budowa i zasada działania.
3. Spektrometr gamma, budowa i zasada działania.

Pomoc merytoryczna do opracowania wyników.

Widmo energetyczne promieniowania gamma emitowanego przez materiał promieniotwórczy jest z reguły widmem liniowym (dyskretnym) o niewielkiej, często jednej, liczbie występujących energii. Stąd w wielu przypadkach zastosowanie urządzeń pozwalających określić te energie nawet ze stosunkowo niedużą dokładnością może dostarczyć wystarczającej informacji o rodzaju źródła promieniotwórczego i jego aktywności. Do takiego celu bardzo dobrze nadają się scyntylacyjne spektrometry gamma. Jako materiał scyntylacyjny najczęściej stosuje się kryształ NaJ(Tl). Uproszczony schemat takiego spektrometru jest pokazany na rys.1.



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy scyntylacyjnego spektrometru y: S - scyntylator; F - fotopowielacz; W -wzmacniacz; A - analizator amplitudy (jedno- lub wielokanałowy).

W spektrometrze scyntylacyjnym odpowiedzią na wniknięcie do scyntylatora fotonu gamma jest pojawienie się na wejściu analizatora A impulsu napięciowego o pewnej amplitudzie, powiedzmy U. W przypadku analizatora wielokanałowego cały zakres możliwych amplitud napięcia jest podzielony na ponumerowane przedziały (z reguły równe) -zwane kanałami - tak że pojawienie się impulsu z określonego przedziału amplitud powoduje zarejestrowanie go w pamięci odnośnego kanału. W przypadku analizatora jednokanałowego, zmieniamy sukcesywnie przedział amplitud impulsów przepuszczanych do analizatora (i rejestrowanych w nim lub sprzężonym z nim przeliczniku). W obu przypadkach wynikiem pomiaru jest tzw. rozkład amplitud - niekiedy mówi się o widmie amplitud. Analiza tego widma pozwala wnioskować o widmie energetycznym fotonów gamma. Dobra znajomość spektrometru pozwala przy znajomości widma energetycznego promieniowania gamma przewidzieć kształt widma amplitud impulsów, natomiast wnioskowanie w drugą stronę z reguły jest mniej jednoznaczne.

Podstawowymi charakterystykami spektrometru są:

- 1) odpowiedź spektrometru (odnośne widmo amplitud impulsów) na monoenergetyczne promieniowanie gamma;
- 2) energetyczna zdolność rozdzielcza;
- 3) zależność wydajności rejestracji od energii fotonów gamma.

O wartości amplitudy U impulsu pojawiającego się na wejściu analizatora spektrometru

scyntylicyjnego decydują:

- energia wytworzonego w scyntylatorze błysku (jej miarą może być liczba powstałych fotonów luminescencyjnych) – E_s ,
- współczynnik charakteryzujący wydajność konwersji foton-elektron katody fotopowielacza – K_f , wzmocnienie strumienia elektronów w powielaczu – W_p oraz wzmocnienie – W_w , co możemy zapisać wzorem

$$1. \quad U \cong \text{const. } E_s K_f W_p W_w.$$

Znak przybliżonej równości odzwierciedla fakt, że występujące tu procesy (jak np. konwersja foton-elektron) mają charakter statystyczny i odnośne współczynniki odzwierciedlają średnie efekty. We wzorze (1) trzy końcowe parametry można przyjąć za niezależne od czynnika wywołującego błysk, wobec czego:

$$2. \quad U = A' E_s,$$

gdzie A' jest pewną stałą aparaturową.

Energia błysku E_s jest z dobrym przybliżeniem proporcjonalna do energii ΔE straconej przez cząstkę jonizującą w materiale scyntylatora; gdy cząstka taka, np. elektron, zostanie pochłonięta w scyntylatorze będzie to energia, jaką cząstka miała wnikając do niego). Ostatecznie więc mamy:

$$3. \quad U = A \Delta E,$$

gdzie A jest stałą aparaturową. Można ją wyznaczyć z pomiaru amplitudy impulsu przy znanej wartości ΔE (najlepiej to robić powodując pochłanianie cząstki o znanej energii E_{cz} w scyntylatorze; wtedy $\Delta E = E_{cz}$).

Fotony gamma przechodząc przez substancję mogą niekiedy przenikać przez stosunkowo grube jej warstwy bez żadnego oddziaływania; w przypadku scyntylatora oznacza to możliwość przeniknięcia przezeń fotonu gamma bez wywołania błysku czyli scyntylacji. Istnieje jednak skończone prawdopodobieństwo (przy grubym scyntylatorze nawet duże), że wystąpi jeden z trzech procesów:

- zjawisko fotoelektryczne,
- rozproszenie komptonowskie,
- tworzenie par $e^- e^+$.

Wtedy nadal będzie obowiązywać wzór (3), ale przez ΔE należy rozumieć sumaryczną energię straconą przez cząstki naładowane (elektrony, pozytony) powstałe w scyntylatorze w wyniku oddziaływania pierwotnego fotonu gamma (i ewentualnie jego pochodnych) z materiałem scyntylatora. Dla uproszczenia będziemy przyjmować, że powstałe w scyntylatorze elektrony i pozytony są w nim pochłaniane.

Aby w wyniku wniknięcia fotonu gamma do scyntylatora pojawił się w nim błysk,

musi zajść jedno z wyżej wymienionych trzech zjawisk. Możliwość wywołania przez foton gamma każdego z tych zjawisk może być scharakteryzowana odpowiednim liniowym współczynnikiem absorpcji, powiedzmy μ_f dla fotoefektu, μ_c dla Comptona i μ_p dla zjawiska tworzenia par. Jeżeli zatem korzystać z dobrze skolimowanej wiązki fotonów gamma (powiedzmy o zadanej energii E_γ ; współczynniki μ_i zależą od niej) skierowanej prostopadle do powierzchni scyntylatora, to całkowita wydajność scyntylatora wynika ze wzoru:

$$4. \quad \varepsilon_s = [1 - \varepsilon^{-d\mu}],$$

gdzie d jest grubością scyntylatora, a

$$5. \quad \mu(E_\gamma) = \mu_f(E_\gamma) + \mu_c(E_\gamma) + \mu_p(E_\gamma) \quad .$$

Względny udział poszczególnych procesów w tej wydajności wynosi odpowiednio:

$$6. \quad \varepsilon'_f = \frac{\mu_f}{\mu}, \text{ dla fotoefektu}$$

$$\varepsilon'_c = \frac{\mu_c}{\mu}, \text{ dla efektu Comptona}$$

$$\varepsilon'_p = \frac{\mu_p}{\mu}, \text{ dla tworzenia par.}$$

Rozważmy kolejno co dzieje się w scyntylatorze przy zajściu któregoś z tych procesów.

W przypadku fotoefektu energia fotonu gamma zostaje przetworzona w energię kinetyczną elektronu i promieniowania rentgenowskiego wzbudzonego atomu. Praktycznie można przyjąć, że ΔE we wzorze (3) jest równe wtedy E_γ ; odnośne amplitudy U (dla wielu takich procesów) oscylują w okolicy $U = A E_\gamma$. W przypadku rozproszenia komptonowskiego energia pierwotnego fotonu E_γ jest dzielona między kwant rozproszony (E'_γ) i elektron odrzutu (E_c) przy czym energia elektronu może się zmieniać

$$7. \quad E_{c\max} = E_\gamma \left[1 - \left\{ \frac{\alpha}{1 + \alpha} \right\} \right] = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha}$$

gdzie

$$8. \quad \alpha = \frac{E_\gamma}{mc^2};$$

jest stosunkiem energii fotonu gamma do energii spoczynkowej elektronu, a więc w tym przypadku mamy więc:

$$9. \quad 0 < \Delta E < E_{c\max} \quad .$$

Jeżeli rozproszony foton zostanie również pochłonięty w scyntylatorze, to wielkość ΔE jest taka sama jak dla fotoefektu wywołanego fotonem pierwotnym.

Tworzenie par $e^- e^+$ jest możliwe dopiero wtedy gdy energia fotonu γ przewyższa podwójną energię spoczynkową elektronu (1,022 MeV). Zrodzone w tym procesie elektron i pozyton są hamowane w scyntylatorze oddając mu energię kinetyczną, równą

$$10. \quad E_{p \min} = E_{\gamma} - 2m_e c^2 ,$$

Zatrzymany pozyton anihiluje z jednym z elektronów scyntylatora, przy czym następuje emisja dwu fotonów anihilacyjnych o energii 0,511 MeV każdy. Jeżeli oba te fotony opuszczają scyntylator to mamy:

$$11. \quad \Delta E = E_{p1} = E_{\gamma} - 2m_e c^2 .$$

Jeżeli jeden z tych fotonów zostanie pochłonięty w scyntylatorze (będzie to z pewnością fotoefekt), wtedy:

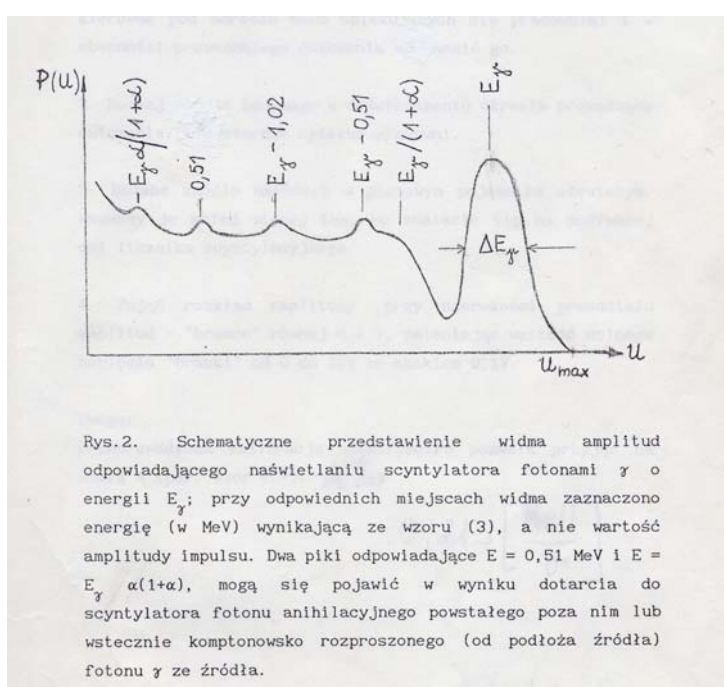
$$12. \quad \Delta E = E_{p2} = E_{p1} + m_e c^2 = E_{\gamma} - m_e c^2 ,$$

Jeżeli oba fotony anihilacyjne zostaną pochłonięte to:

$$13. \quad \Delta E = E_{p1} + 2m_e c^2 = E_{\gamma}$$

ma taką samą wartość jak dla fotoefektu.

Zatem widmo amplitud będące odpowiedzią spektrometru scyntylacyjnego (uściślijmy: prostego, jednolicznikowego) jest bardzo skomplikowane i rozciąga się od $U = 0$ do U_{max} bliskiego $U = A E_{\gamma}$. Schematycznie jest ono pokazane na rysunku 2.



Dla celów analizy energetycznej promieniowania γ -y najistotniejszym fragmentem widma amplitudowego z rys. 2. jest pik związany z zamianą całej pierwotnej energii fotonu gamma w energię prowadzącą do powstania błysku. Jeżeli jest on wyraźnie oddzielony od pozostałej części widma (dostatecznie wąski) to możemy mówić o dobrej charakterystyce spektrometru w zakresie energii fotonów gamma z obszaru bliskiego E_γ . Z położenia wierzchołka tego piku (potrzebna jest wcześniejsza kalibracja spektrometru - wyznaczenie stałej A występującej we wzorze (3)) można wnioskować o energii fotonów gamma. Wnioskowanie to, a w szczególności rozdzielanie takich pików odnoszących się do dwu lub więcej populacji fotonów gamma (o różnych energiach) docierających do scyntylatora będzie tym lepsze, im piki te będą węższe i im większa będzie ich powierzchnia (P_f) w stosunku do całej powierzchni pod wykresem widma (P_c). Szerokość piku na połowie jego wysokości ΔE (wyrażona za pomocą wzoru (3)) w jednostkach energii a nie napięcia - oznacza bezwzględną energetyczną zdolność rozdzielczą spektrometru dla danej energii E , a wielkość

$$14. \quad V = \frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma},$$

nosi nazwę względnej zdolności rozdzielczej; często podaje się ją nie ułamkowo (np. 0,05) a procentowo (np. 5%).

Cel doświadczenia:

Celem doświadczenia jest pomiar widma energetycznego dla źródeł promieniowania gamma, określenie energii poszczególnych linii tego promieniowania oraz wyznaczenie zdolności rozdzielczej spektrometru.

Schemat układu doświadczalnego jest analogiczny do układu opisanego w części teoretycznej, idea pomiaru również.

Technika pomiarów.

1. Zapoznać się z układem pomiarowym (wszelkie wątpliwości kierować pod adresem osób opiekujących się pracownią).

2. Zdjąć rozkład amplitudy przy szerokości przedziału amplitud – tzw. "bramce" równej 0,1 [V], zmieniając wartość dolnego napięcia "bramki" od 0 do 10V ze skokiem 0,1 [V] dla trzech, otrzymanych od opiekuna pracowni, źródeł promieniotwórczych tzn. Na^{22} , Co^{60} oraz Cs^{137} .

Opracowanie wyników:

1. Sporządzić wykresy zależności szybkości zliczeń od napięcia progowego analizatora, $I = I(U_p)$ - tzw. widmo amplitudowe. W okolicy maksimum nanieść niepewności pomiarowe (wyjaśnić dlaczego akurat tam).

2. Korzystając z widma energetycznego Na^{22} oraz informacji o wartości energii E_s fotonów powstających w wyniku anihilacji par e^+e^- wyznaczyć stałą kalibracyjną A spektrometru.

$$A = U_s/E_s, \text{ gdzie } E_s = 0,511 \text{ MeV},$$

a U_s – jest średnią amplitudą sygnału uwarunkowanego rejestracją fotonu anihilacyjnego.

3. Korzystając z wyznaczonej stałej kalibracyjnej spektrometru określić energię promieniowania gamma - E_γ dla wszystkich badanych źródeł.

4. Wyznaczyć energetyczną zdolność rozdzielczą spektrometru (szczegóły w pomocy merytorycznej).

5. Otrzymane wyniki porównać z wartościami katalogowymi. Końcowe wnioski i obliczenia przedstawić w tabelach i przedyskutować.