

## Ćwiczenie nr 51

# BADANIE WŁASNOŚCI PROMIENIOWANIA GAMMA PRZY POMOCY SPEKTROMETRU SCYNTYLACYJNEGO

### I. Podstawy fizyczne

#### 1. Wstęp

Emisja krótkofalowego promieniowanie elektromagnetycznego jest jedną z możliwości<sup>1)</sup> wypromieniowywania energii przez wzbudzone jądra atomowe  $X^*$ . Promieniowanie to nazywane promieniowaniem gamma stanowią elementarne porcje energii  $h\nu$  zwane fotonami (kwantami). Rozpad gamma zapisujemy równaniem:

$$X^* = X + h\nu \quad [1]$$

Analogicznie jak atomy, które emitują promieniowanie elektromagnetycznego o określonych energiach zależnych od poziomów elektronowych tak jądra atomowe wysyłają fotony promieniowania o energiach odpowiadających różnicom między poziomami energetycznymi stanu początkowego jądra  $E_i$  i końcowego  $E_f$  zgodnie z równaniem:

$$h\nu = E_i - E_f \quad [2]$$

Jądro atomowe może emitować jeden lub kilka monoenergetycznych fotonów gamma o różnych energiach w zależności od tego czy następuje przejście bezpośrednio do stanu podstawowego jądra czy też poprzez stany pośrednie. Promieniowanie gamma towarzyszy zwykle innym przemianom jądrowym takim jak alfa lub beta w wyniku których powstaje jądro w stanie wzbudzonym.

Energie kwantów gamma emitowane przez różne jądra atomowe zawierają się w obszarze od 10 keV do 5 MeV.

Określając energie fotonów gamma emitowanych przez wzbudzone jądra atomowe można wyznaczać energie poziomów jądrowych.

---

<sup>1)</sup>Wzbudzone jądro może również bezpośrednio przekazać energię swojego wzbudzenia elektronowi z powłoki elektronowej bez emisji promieniowania gamma. Energia kinetyczna wylatującego elektronu jest wtedy równa różnicy energii wzbudzenia jądra i energii wiązania elektronu, a zjawisko nosi nazwę konwersji wewnętrznej.

## 2. Oddziaływanie promieniowania gamma z materią.

Dla energii fotonów emitowanych w przejściach wzbudzonych jąder atomowych do niższych stanów energetycznych dominujące znaczenie mają trzy zjawiska: efekt fotoelektryczny, efekt Comptona i efekt tworzenia par.

W zjawiskach tych promieniowanie gamma przekazują swą energię całkowicie lub częściowo elektronom zwanym elektronami wtórnymi.

### Efekt fotoelektryczny

W efekcie fotoelektrycznym energia fotonu gamma zostaje całkowicie zaabsorbowana przez elektron. Zjawisko to może zachodzić tylko na elektronach związanych przy czym energia fotonu musi być większa od energii wiązania elektronu  $W_n$ . Jeśli warunek ten jest spełniony atom zostaje zjonizowany, a energię kinetyczną wybitego fotoelektronu  $E_{ke}$  określa równanie:

$$E_{ke} = h\nu - W_n \quad [3]$$

Prawdopodobieństwo zajścia efektu fotoelektrycznego rośnie ze wzrostem energii wiązania elektronów, dlatego też przy dostatecznie wysokiej energii fotonów wybijane są elektrony głównie z powłoki K atomu. Zajście zjawiska zależy również od liczby atomowej absorbenta i jest proporcjonalne do  $Z^n$  przy czym wykładnik potęgowy  $n$  zmienia się od 4 do 4.6 w zależności od energii fotonów.

Efektowi fotoelektrycznemu towarzyszy emisja rentgenowskiego, promieniowania charakterystycznego. Miejsca na powłokach elektronowych po wybitych elektronach zapełniane są przez elektrony z wyższych powłok i emitowane jest monoenergetyczne charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie.

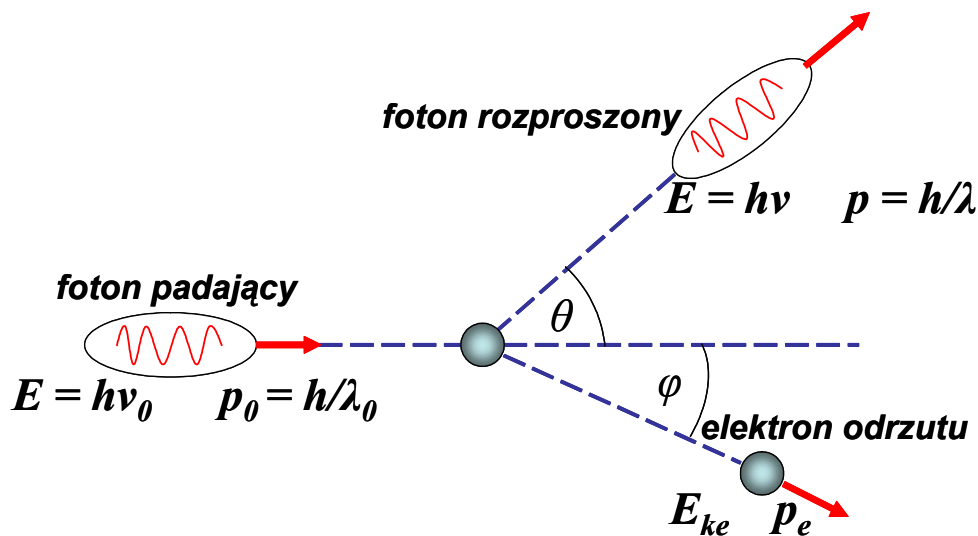
### Efekt Comptona

Efekt Comptona polega na rozpraszaniu fotonów gamma na swobodnych elektronach, przy czym elektrony możemy uważać za swobodne gdy energia fotonu jest dużo większa od energii wiązania elektronów na elektronowych powłokach atomowych.

Jeśli założymy, że początkowo elektron swobodny jest nieruchomy to zasadę zachowania energii możemy zapisać w postaci:

$$h\nu_0 = h\nu + E_{ke} \quad [4]$$

$E_{ke}$  jest energią kinetyczną elektronu odrzuconego w wyniku zderzenia z fotonem  $h\nu_0$ , energia fotonu rozproszonego równa jest  $h\nu$ .



**Rys. 1.** Rozpraszanie komptonowskie fotonów gamma na swobodnym elektronie.

Elektron może być odrzucony z prędkością bliską prędkości światła dlatego musimy uwzględnić tu ogólne (obejmujące również przypadki relatywistyczne) wyrażenia na energię kinetyczną i energię całkowitą elektronu  $E_c$  :

$$E_{ke} = (m - m_0)c^2 \quad [5]$$

gdzie  $m$  i  $m_0$  to odpowiednio masa relatywistyczna i spoczynkowa elektronu.

$$E_c^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2 \quad [6]$$

Gdzie  $p = h / \lambda$ <sup>1)</sup> jest pędem, a  $m_0c^2 = 0.51 \text{ MeV}$  energią spoczynkową elektronu.

Problem jest dwuwymiarowy i z zasady zachowania pędu wzdłuż osi  $x$  i  $y$  (Rys.2) mamy:

$$p_0 = p \cos\theta + p_e \cos\varphi \quad [7a]$$

$$0 = p \sin\theta - p_e \sin\varphi \quad [7b]$$

Wykorzystując powyższe równania możemy obliczyć energię odrzutu elektronu, która jest zależna od energii padającego fotonu oraz kąta jego rozproszenia zgodnie z zależnością:

$$E_e(\theta) = (h\nu_0)^2 \frac{1 - \cos\theta}{m_0c^2 + h\nu_0(1 - \cos\theta)} \quad [8]$$

Możemy również określić przesunięcie komptonowskie  $\Delta\lambda$  równe różnicy pomiędzy długością fotonu rozproszonego  $\lambda$  i padającego  $\lambda_0$ , które zależy od kąta rozproszenia fotonu oraz od masy cząstki na której foton jest rozpraszany:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \quad [9]$$

$h/m_0c$  nosi nazwę komptonowskiej długości fali długości.

<sup>1)</sup> foton promieniowania  $h\nu$  posiada pęd równy  $h\nu/c = h/\lambda$

Z równania [8] wynika że, energia elektronów odrzutu zmienia się od wartości równej zero dla  $\theta = 0^\circ$  do energii maksymalnej przy  $\theta = 180^\circ$  tj. gdy fotony rozpraszane są wstecz. Elektrony odrzutu obdarzone maksymalną energią wylatują pod kątem  $\varphi = 0^\circ$ , a ich energię można obliczyć z zależności:

$$E_{e \max} = \frac{2(h\nu_0)^2}{m_0c^2 + 2h\nu_0} \quad [10]$$

### **Efekt tworzenia (kreacji) pary**

Foton o energii dostatecznie dużej może wytworzyć parę elektron-pozyton ( ${}_{-1}^0e, {}_{+1}^0e$ ). Zjawisko to ze względu na prawa zachowania energii i pędu nie może mieć miejsca w próżni. Para ( ${}_{-1}^0e, {}_{+1}^0e$ ) może powstać jedynie w obecności obdarzonej ładunkiem elektrycznym trzeciej cząstki: jądra lub elektronu. Minimalną energię fotonu wystarczającą do wytworzenia pary elektron-pozyton w polu kulombowskim cząstki o masie M określa zależność:

$$h\nu_{\min} = 2m_0c^2 (1 + m_0/M) \quad [11]$$

W przypadku oddziaływania fotonu z jądrem para może zostać wykreowana gdy energia fotonu jest co najmniej równa energii spoczynkowej elektronu i pozytonu, czyli:

$$h\nu \geq 2m_0c^2 \quad [12]$$

gdzie  $2m_0c^2 = 1,02 \text{ MeV}$ .

Jeśli energia fotonu jest większa od 1,02 MeV to jej nadmiar przekazany zostanie parze w postaci energii kinetycznej, a zasadę zachowania energii, przy zaniedbaniu odrzutu jądra będzie przedstawiać równanie:

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_k({}_{-1}^0e) + E_k({}_{+1}^0e) \quad [13]$$

Procesem odwrotnym do procesu tworzenia pary jest zjawisko anihilacji. Pozytony mające bardzo krótki czas życia ulegają anihilacji z elektronem otoczenia w wyniku czego powstają dwa fotony anihilacyjne o energii 0.51 MeV każdy. Fotony te są kolinearne czyli wylatują względem siebie pod kątem  $180^\circ$ .

### **Prawo absorpcji**

Promieniowanie elektromagnetyczne, a więc również promieniowanie jądrowe gamma, przy przechodzeniu przez materię zanika eksponencjalnie. Dzieje się tak dlatego, że poszczególne fotony promieniowania usuwane są z wiązki w pojedynczym akcie całkowitej absorpcji lub rozproszenia.

Zależność natężenia I wiązki promieniowania gamma po przejściu absorbenta o grubości x określa równanie absorpcji :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad [14]$$

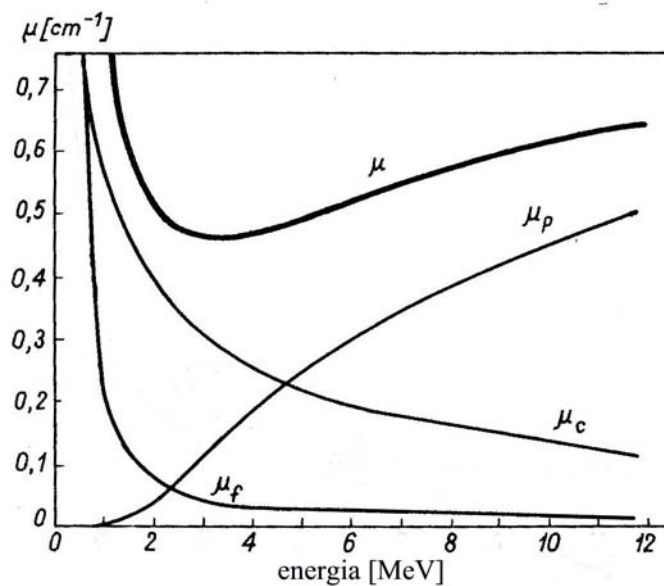
Gdzie  $I_0$  jest natężeniem początkowym wiązki, a  $\mu$  całkowitym liniowym współczynnikiem absorpcji.

Całkowity liniowy współczynnik absorpcji zależy od energii padającego promieniowania gamma i liczby atomowej  $Z$  absorbenta. Zachodzi związek:

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_p \quad [15]$$

gdzie,  $\mu_f$ ,  $\mu_c$  i  $\mu_p$  to odpowiednio liniowe współczynniki absorpcji związane z efektem fotoelektrycznym, Comptona i efektem tworzenia par.

Rys.2 przedstawia zależność liniowych współczynników absorpcji: całkowitego i cząstkowych dla ołowiu w funkcji energii fotonów gamma.

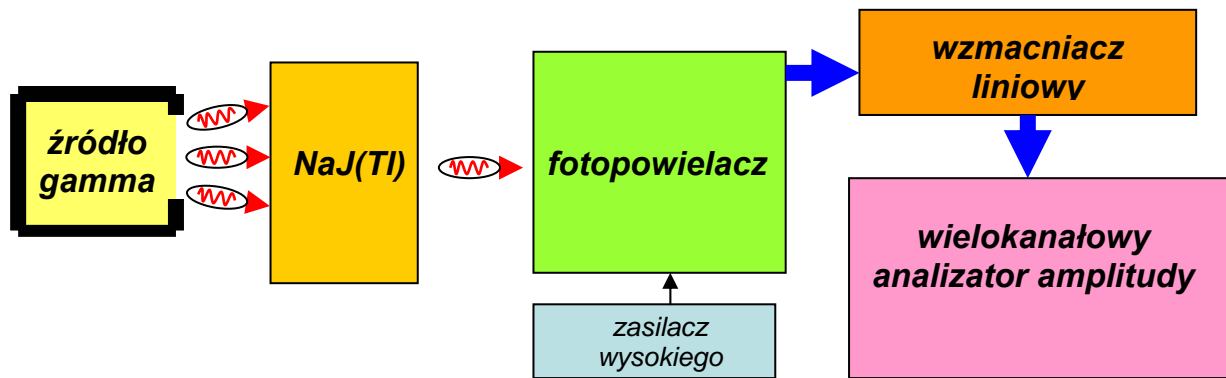


**Rys.2.** Zależność liniowych współczynników absorpcji: całkowitego i cząstkowych dla ołowiu w funkcji energii fotonów gamma.

## II. Zasada działania spektrometru scyntylicyjnego do detekcji promieniowania gamma.

Spektrometr scyntylicyjnego składa się z kryształu scyntylicyjnego, fotowielacza, wzmacniacza liniowego i wielokanałowego analizatora amplitud. Schemat blokowy spektrometru przedstawiony jest na **Rys.3**.

Podstawowym elementem spektrometru scyntylicyjnego promieniowania gamma jest posiadający własności luminescencyjne, nieorganiczny monokryształ jodku sodu aktywowanego talem - NaJ(Tl).



**Rys. 3.** Schemat blokowy spektrometru scyntylicyjnego.

W wyniku oddziaływania fotonów gamma z kryształem scyntylicyjnym elektrony wtórne powstające w trzech zjawiskach przedstawionych wcześniej wywołują w luminescencji w postaci błysków świetlnych (scyntytacji) o częstotliwości leżącej w części widzialnej lub w nadfiolecie widma elektromagnetycznego.

Energie scyntytacji otrzymane na wyjściu kryształu są proporcjonalne do energii elektronów wtórnych. Tak więc widmo energetyczne uzyskane w spektrometrze jest właściwie widmem energetycznym elektronów, których energia związana jest z fotonami gamma poprzez omawiane zjawiska.

Kryształ scyntylicyjny sprzężony jest optycznie z fotopowielaczem w którego skład wchodzi fotokatoda, układ elektrod tzw. dynod i anoda. Scyntyłacje (fotony) absorbowane są przez fotokatodę i wybijają z niej fotoelektrony, które są następnie przyspieszane w kierunku pierwszej dynody, przy czym jeden elektron wybija od 2 do 5 elektronów. Elektrony te kierowane są od dynody do dynody przez stałe pole elektrostatyczne powstałe na skutek przyłożonego do fotopowielacza napięcia. Jeśli współczynnik mnożenia pojedynczej dynody wynosi  $R$  to przy  $n$  dynodach współczynnik wzmocnienia (powielenia) wynosi  $M = wR^n$ , gdzie  $w$  jest współczynnikiem określającym wydajność zbierania elektronów przez układ dynod. Ilość dynod w zależności od typu fotopowielacza waha się od 9 do 14, a współczynnik wzmocnienia od  $10^5$ -  $10^7$ .

Po przejściu przez dynody elektrony zbierane są na anodzie dają impulsy prądowe zamieniane na oporze połączonym w szereg z fotopowielaczem na impulsy napięciowe (proporcjonalne do energii przekazanej kryształowi scyntylicyjnego przez elektrony wtórne powstające głównie w zjawisku fotoelektrycznym i w procesie rozpraszania komptonowskiego).

Impulsy napięciowe wzmacniane są następnie przez wzmacniacz liniowy i przekazywane do wielokanałowego analizatora amplitudy (WAA).

Działanie WAA polega na przetworzeniu wzmocnionych impulsów wejściowych na

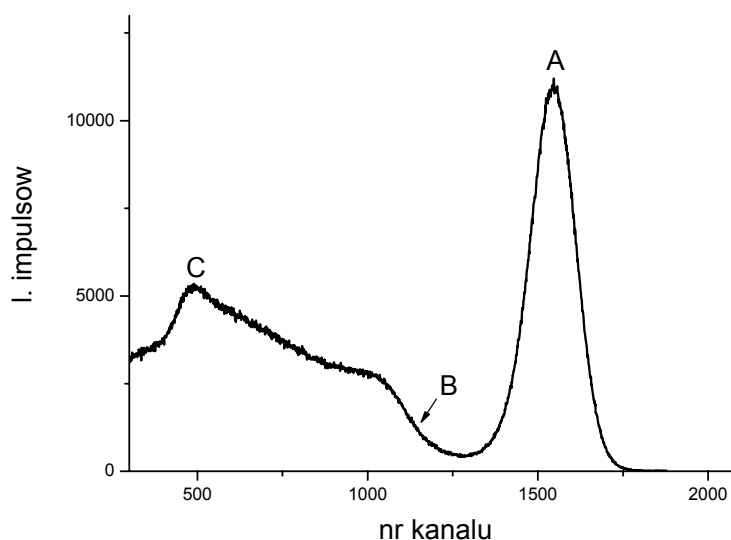
znormalizowane impulsy pomocnicze dzięki przetwornikowi analogowo-cyfrowemu. Konkretnemu przedziałowi amplitud wejściowych (energii) przyporządkowuje się stałą liczbę znormalizowanych impulsów i numer kanału co umożliwia posegregowanie impulsów w zależności od amplitudy (energii) i zliczenie ich w odpowiednich kanałach.

Zawartość kanałów jest następnie odwzorowywana w postaci widma energetycznego tj. zależności liczby impulsów wejściowych od ich energii.

### Kształt spektrogramu

Spektrogram energetyczny promieniowania gamma uzyskany dla izotopu  $^{137}\text{Cs}$  przedstawia **Rys.4**. Oś x określa numer kanału natomiast oś y podaje liczbę impulsów zarejestrowanych w danym kanale (im wyższa energia tym wyższy numeru kanału).

Spektrogram od strony wysokich energii rozpoczyna maksimum odpowiadające całkowitej absorpcji fotonów gamma w kryształach scyntylacyjnych. (**A** na **Rys.4**) Całkowita absorpcja fotonów związana jest z efektem fotoelektrycznym stąd maksimum to nazywane jest fotopikiem.



**Rys.4.** Spektrogram energetyczny  $^{137}\text{Cs}$  .

Kolejna część spektrogramu związana jest z komptonowskimi elektronami odrzutu. Widmo elektronów komptonowskich jest ciągłe. Rozpoczyna je krawędź Comptona **B** związana z elektronami o energii maksymalnej (rozproszenie wsteczne fotonów). Energię krawędzi Comptona można wyznaczyć z równania **[10]**. Ciągłe

widmo komptonowskie kończą elektrony odrzutu o energii zerowej (fotony nie ulegają rozproszeniu;  $\theta = 0^\circ$ )

Promieniowanie gamma emitowane przez źródło może również ulegać rozproszeniu komptonowskiemu poza kryształem scyntylicyjnym np. obudowie układu pomiarowego, fotopowielacza czy też w samym źródle. Część rozproszonych wstecznie fotonów kieruje się do kryształu scyntylicyjnego tworząc na spektrogramie maksimum rozproszenia wstecznego **C**. Maksimum to nakłada się na ciągłe widmo komptonowskie, a jego energię można określić z równania [4] przyjmując  $E_{ke}$  równą maksymalnej energii elektronu odrzutu.

### III. Wykonanie pomiarów

1. Włączyć wzmacniacz liniowy i zasilanie fotopowielacza.
2. Włączyć komputer z zainstalowaną kartą wielokanałowego analizatora amplitudy impulsów TUKAN (w zestawie drugim WAA impulsów SWAN) uruchomić program do akwizycji i obróbki widm). Włączyć drukarkę.
3. Wstawić do domku pomiarowego zamknięty pojemnik ze źródłem promieniowania gamma, zdjąć pokrywkę źródła i zamknąć domek pomiarowy.
4. Wystartować pomiar i rejestrować widmo energetyczne co najmniej przez 600 sek.
5. Określić numery kanałów i ilość znajdujących się w nich impulsów dla pików absorpcji całkowitej, krawędzi komptonowskich i maksimum rozproszenia wstecznego.
6. Wydrukować i opisać uzyskany spektrogram.
7. Po wyjęciu zmierzonego źródła zarejestrować widma energetyczne dla dwóch pozostałych źródeł promieniowania gamma postępując analogicznie jak w pkt. 3-6.

### IV. Opracowanie wyników

1. Określić, korzystając ze schematów rozpadu energie fotonów gamma emitowanych ze źródeł stosowanych w ćwiczeniu ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ). Wyliczyć wartości krawędzi komptonowskich i energii rozproszenia wstecznego. Określone wartości energii wpisać do kolumn „wartości teoretyczne” tabel znajdujących się w protokole ćwiczenia.



2. Skojarzyć otrzymane widma energetyczne z poszczególnymi źródłami i wpisać w kolumnie „numer kanału” odpowiednie wartości wyznaczone wcześniej
3. Stosując metodę najmniejszych kwadratów dla wskazanych przez prowadzącego ćwiczenie punktów kalibracyjnych określić równanie prostej kalibracyjnej -  $E = f(\text{nr kanału})$ . Wyliczyć wartości doświadczalne widocznych elementów widm energetycznych i wpisać ich wartości wraz z popełnianym błędem w kolumnę „wartości doświadczalne”.
4. Omówić uzyskane widma energetyczne.
5. Określić energetyczną zdolność rozdzielczą spektrometru określaną jako stosunek szerokości fotopików w połowie wysokości  $\Delta E$  do położenia ich maksimum  $E$ :

$$R = \Delta E/E \cdot 100\%$$

## **V. Problemy i pytania kontrolne**

1. Co to jest i jak powstaje promieniowanie gamma? Czy jest promieniowaniem monoenergetycznym czy też ciągłym?
2. Przedstawione na str. 12 schematy rozpadów promieniotwórczych zapisać w postaci równań reakcji jądrowych. Czy w rozpadzie typu beta i beta plus z jąder promieniotwórczych emitowane są tylko elektrony lub pozytony?
3. Dlaczego chroniąc się przed promieniowaniem gamma stosuje się osłony zawierające pierwiastki o wysokiej liczbie atomowej?
4. Omówić efekt fotoelektryczny i efekt Comptona. Jaką naturę wykazuje promieniowanie elektromagnetyczne w tych efektach. Dokonać porównania tych zjawisk.
5. Co to jest kreacja pary elektron-pozyton, a co oznacza jej anihilacja?
6. Z którego ze źródeł przedstawionych na str.11 oprócz fotonów gamma do kryształu scyntylicyjnego docierają będą fotony anihilacyjne i dlaczego?
7. Co to jest krawędź Comptona i jak określić jej teoretyczną wartość?
8. Dlaczego kryształ scyntylicyjny bombardowany jest nie tylko fotonami gamma ale również monoenergetycznymi fotonami rozproszenia wstecznego? Jak wyliczyć przewidywaną wartość rozpraszanych wstecznie fotonów?
9. Jakie impulsy; elektryczne czy optyczne, pojawiają się na wyjściu kryształu scyntylicyjnego?
10. Jaką rolę w układzie pomiarowym odgrywa wielokanałowy analizator amplitud?

## VI. Literatura

1. Strzałkowski, Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN W-wa, 1969.
2. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, tom 5, PWN W-wa, 2003.

