

Ćwiczenie nr 11

BADANIE WŁASNOŚCI PROMIENIOWANIA GAMMA PRZY POMOCY SPEKTROMETRU SCYNTYLACYJNEGO

I. Podstawy fizyczne

1. Wstęp

Emisja krótkofalowego promieniowanie elektromagnetycznego jest jedną z możliwości¹⁾ 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 elektromagnetyczne 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.

¹⁾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 przekazuje 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 zapelniane są przez elektrony z wyższych powłok i emitowane jest monoenergetyczne charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie.

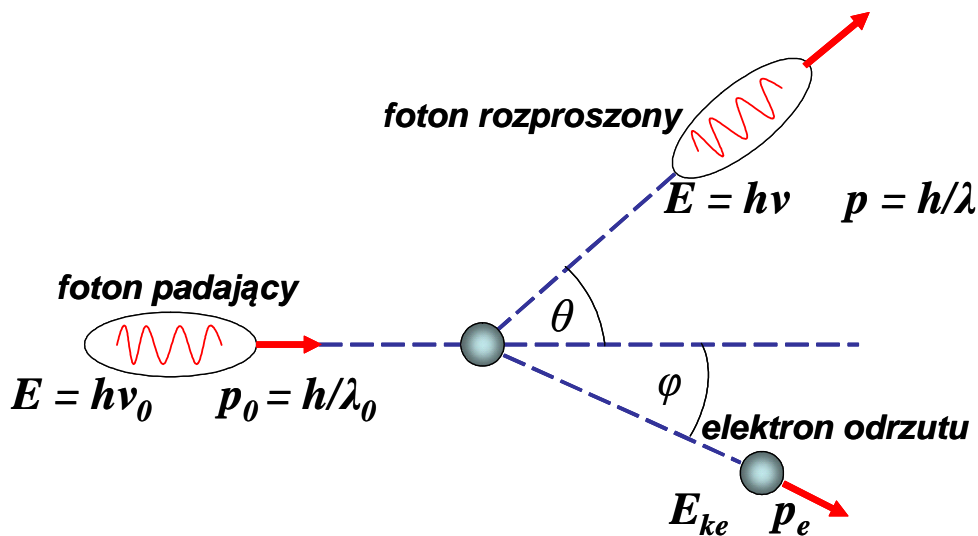
Efekt Comptona

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 energie 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 $p = h / \lambda$ ¹⁾ 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 λ i padającego λ_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.

1) 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° .

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 :

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

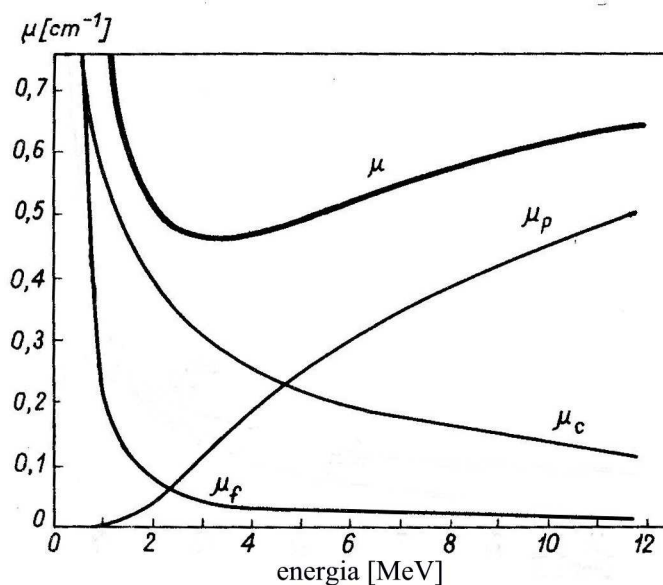
Gdzie I_0 jest natężeniem początkowym wiązki, a μ całkowitym liniowym współczynnikiem absorpcji.

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, μ_f , μ_c i μ_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.

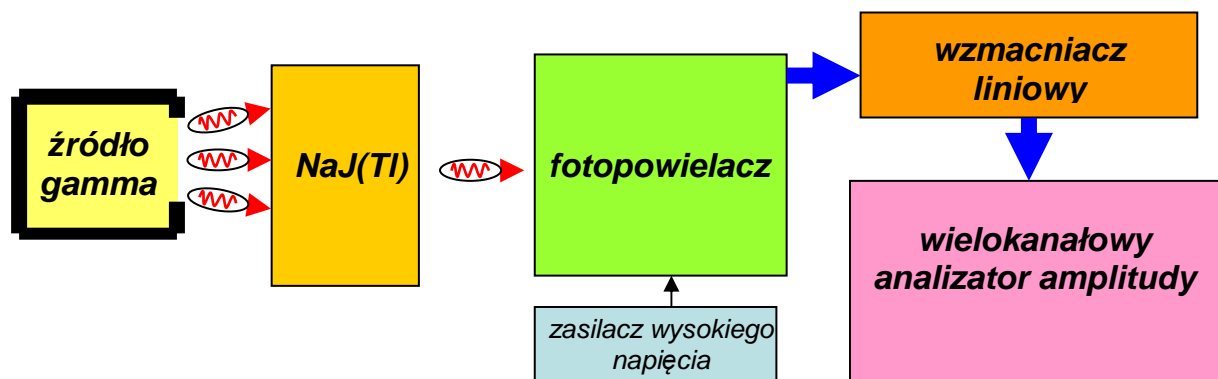


Rys.2. Zależność liniowych współczynników absorpcji: całkowitego i cząstkowych dla ołowiu w funkcji energii fotonów gamma.

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. Scyntytacje (fotony) absorbowane są przez fotokatodę i wybijają z niej fotoelektrony, które są następnie przyśpieszane 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).

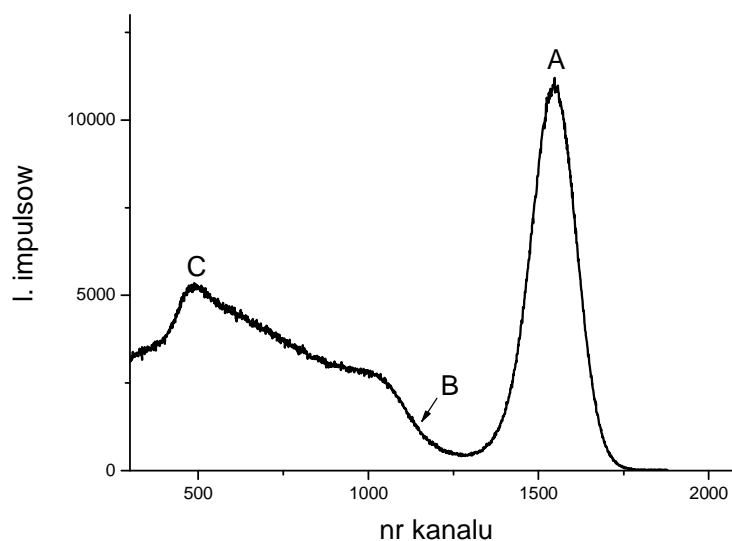
Działanie WAA polega na przetworzeniu wzmocnionych impulsów wejściowych na znormalizowane impulsy pomocnicze dzięki przetwornikowi analogowo-cyfrowemu. Konkretnemu przedziałowi amplitud wejściowych (energii) przyporządkowuje się stałą liczbę znormalizowanych impulsów i numer kanału co umożliwia posegregowanie 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.

Widmo energetyczne (spektrogram)

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

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



Rys.4. Widmo energetyczne (spektrogram) ^{137}Cs .

Dla niższych energii rejestrowane jest widmo związane 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. Obliczenia wstępne / wykonanie pomiarów

1. Korzystając ze schematów rozpadu ^{137}Cs , ^{60}Co i ^{22}Na określić (teoretyczne) energie emitowanych fotonów gamma. Wyliczyć następnie wartości krawędzi komptonowskich i energie odpowiadające maksimum rozpraszania wstecznego. Wpisać je do tabel protokołu w kolumnie **wartości teoretyczne**.
2. Wstawić do domku pomiarowego zamknięty pojemnik ze źródłem promieniowania gamma, zdjąć pokrywkę źródła i zamknąć domek pomiarowy.
3. Włączyć wzmacniacz liniowy i zasilanie fotopowielacza.
4. Aktywować wielokanałowy analizator amplitudy impulsów (ikona TUKAN). Ustawić progi dolny i górny wielokanałowego analizatora amplitudy oraz czas zdejmowania widma (minimum 300 sek.).
5. Zarejestrować widmo i zachować je z rozszerzeniem LST w folderze utworzonym w katalogu WYNIKI znajdującym się na pulpicie.
6. Zaimportować do ORYGIN'a zarejestrowane widmo.
7. Wydrukować i opisać uzyskany spektrogram.
8. Określić numery kanałów dla pików absorpcji całkowitej, krawędzi komptonowskich i pików rozproszenia wstecznego.
9. Zarejestrować widma energetyczne dla dwóch pozostałych źródeł promieniowania gamma.

IV. Opracowanie wyników

1. Odczytane z widm energetycznych numery kanałów dla pików absorpcji całkowitej, krawędzi komptonowskich i maksimum rozpraszania wstecznego wpisać do protokołu w kolumnie **numer kanału**. Oszacować niepewność wyznaczenia numeru kanału z wykresu. Za miarę tej wielkości w przypadku pików przyjąć ich szerokość połówkową, czyli szerokość w połowie wysokości.

2. Wykonać wykres kalibracyjny dla używanego w ćwiczeniu spektrometru. W tym celu wybrać w porozumieniu z prowadzącym odpowiednie punkty kalibracyjne i wykonać wykres energii teoretycznej kwantu gamma E w funkcji odpowiadającego jej kanału n . Do uzyskanych punktów dopasować prostą metodą najmniejszych kwadratów. Wpisać do protokołu wartości współczynnika kierunkowego i wyrazu wolnego wraz z niepewnościami standardowymi typu A.
3. Na podstawie równia prostej kalibracyjnej obliczyć i wpisać do protokołu **wartości doświadczalne** energii dla widocznych elementów zarejestrowanych widm energetycznych. Określić ich (złożone) niepewności pomiarowe biorąc pod uwagę niepewności wyznaczenia numeru kanału oraz niepewności parametrów prostej kalibracyjnej.
Określić energetyczną zdolność rozdzielczą R użytego spektrometru dla wskazanego przez prowadzącego fotopiku. Posłużyć się wzorem: $R = \Delta E/E100\%$, gdzie ΔE to szerokość fotopiku w połowie wysokości, a E położenie jego maksimum.
4. Omówić we wnioskach uzyskane widma energetyczne. W szczególności porównać ich przebieg z krzywymi teoretycznymi i podać przyczyny ewentualnych różnic.

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 scyntylacyjnego docierać będą fotony anihilacyjne i dlaczego?
7. Co to jest krawędź Comptona i jak określić jej teoretyczną wartość?

8. Dlaczego kryształ scyntylacyjny 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 scyntylacyjnego?
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.

