

Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki
Laboratorium Fizyki

ZJAWISKO COMPTONA

Warszawa 2011



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

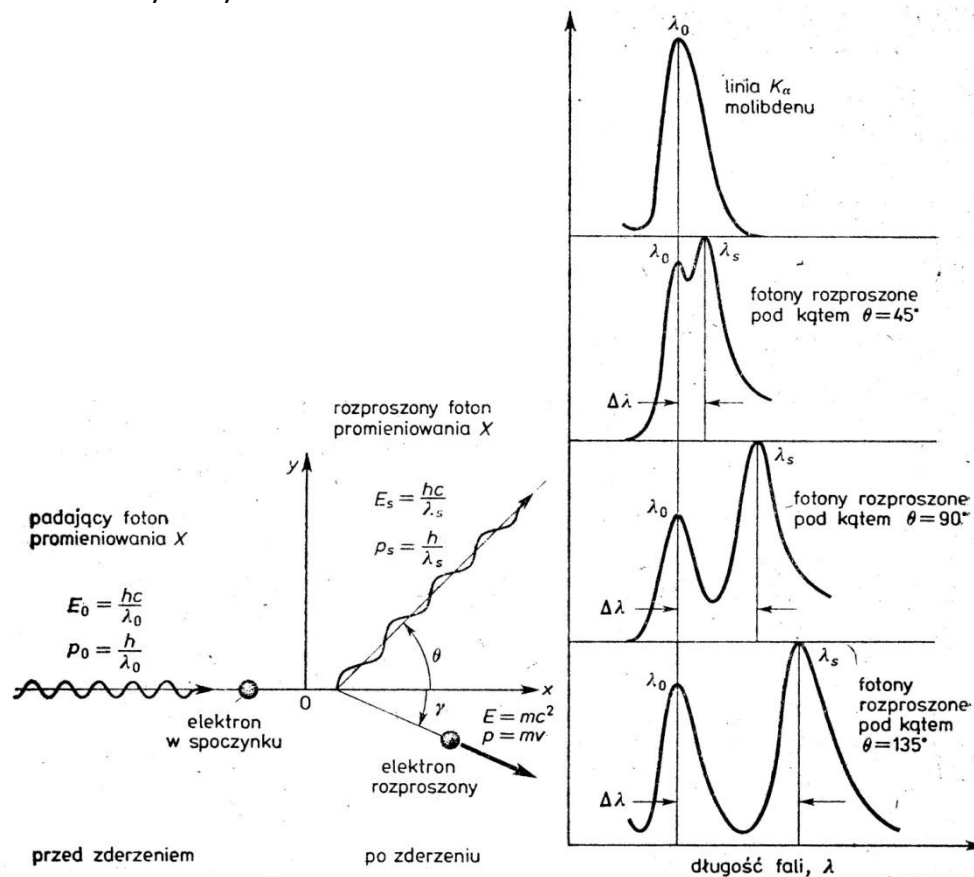


1. Cel zajęć laboratoryjnych

Celem ćwiczenia jest zbadanie efektu Comptona, pomiar rozkładów kątowych natężenia i energii rozproszonych kwantów gamma.

2. Podstawy fizyczne

Zmiana długości fali promieniowania X , występująca w wyniku elastycznego rozpraszania na elektronach, jest znana jako **zjawisko Comptona**. A.H. Compton przeprowadził doświadczenie, w którym kierował wiązkę promieni X o dokładnie określonej długości fali na blok grafitowy, a następnie mierzył natężenie promieni X , dla różnych kątów rozpraszania, jako funkcję ich długości fali. Schemat przebiegu doświadczenia oraz uzyskanych wyników został przedstawiony na rysunku 1.



Rysunek 1. Rozproszenie komptonowskie fotonu na elektronie w spoczynku. Na wykresach po prawej stronie przedstawiono, jak zmienia się długość promieniowania K_{α} molibdenu rozproszonego na węglu.

Chociaż wiązka padająca zawierała jedną długość fali, λ_0 , to rozproszone promienie X mają maksimum rozproszenia przy dwóch długościach fali: początkowej λ_0 i dodatkowej długości fali λ_s , której wartość jest bliska λ_0 . Wtórne promieniowanie X , powstałe w procesie rozpraszania, ma następujące własności:

- λ_s jest zawsze większa od λ_0 ;
- λ_s zależy od kąta rozpraszania θ , ale nie zależy od ośrodka rozpraszającego.

W owym czasie, w ramach teorii falowych uznawano, że mechanizm rozpraszania światła jest następujący: fala świetlna pada na elektron pobudzając go do drgań, elektron następnie drgając wypromieniowuje falę o tej samej częstotliwości. Model ten był zgodny z doświadczeniem dla fal świetlnych – fal o małych częstotliwościach. Dla promieni X i γ natomiast okazywał się niedostatecznym – jeżeli padające promieniowanie traktować jako falę elektromagnetyczną, nie można zrozumieć występowania fali rozproszonej.

A. H. Compton wysunął w roku 1923 śmiałą hipotezę, że padająca wiązka promieni X nie jest falą, lecz zbiorem fotonów o energii $E = hf$, które ulegają sprężystym zderzeniom ze swobodnymi (słabo związanymi) elektronami ośrodka. Padający foton przekazuje część swojej energii elektronowi, z którym się zderza, więc foton rozproszony ma energię niższą niż padający, a więc mniejszą częstotliwość i większą długość fali. Pik w zarejestrowanym widmie odpowiadający niezmienionej długości fali pochodzi ze zderzeń fotonów z elektronami związanymi z rdzeniami atomów węgla (ich masa efektywna jest na tyle duża, że przesunięcie komptonowskie jest dla nich nieobserwowalne).

Eksperyment Comptona był jednym z pierwszych eksperymentów wykazujących kwantową naturę światła. Potwierdził on tym samym, istnienie fotonu jako skończonej porcji energii. Compton za swoją pracę został w 1927r. uhonorowany Nagrodą Nobla.

Zjawisko Comptona odgrywa zasadniczą rolę w procesie osłabiania promieni γ w zakresie energii od 0,5 MeV do 10 MeV [1].

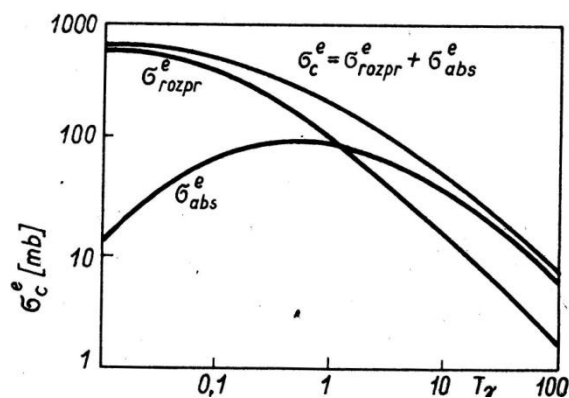
Prawdopodobieństwo zajścia zjawiska Comptona.

W wyniku zjawiska Comptona energia niesiona przez strumień promieni γ ulega częściowo zamianie na energię kinetyczną elektronów, a częściowo rozproszeniu (część uniesiona przez fotony). Wzajemny stosunek tych części zależy od energii kwantów pierwotnych. Zatem całkowita strata energii strumienia promieni γ przechodzącego przez absorbent równa się sumie energii zaabsorbowanej przez elektrony i rozproszonej.

Całkowity przekrój czynny dla zjawiska Comptona na elektron σ_c równa się sumie przekroju dla absorpcji σ_{abs} i dla rozproszenia energii

$$\sigma_c = \sigma_{abs} + \sigma_{rozpr} \quad (1)$$

Przekrój czynny na elektron równa się liczbowo części strumienia cząstek, która spowodowała zajście danego zjawiska przy przejściu strumienia przez tarczę o powierzchni jednostkowej, w której znajduje się 1 elektron. Na rys. 2. przedstawiono zależność σ_c , σ_{abs} i σ_{rozpr} od energii kwantu pierwotnego.



Rysunek 2. Zależność przekrojów czynnych na elektron dla zjawiska Comptona od energii pierwotnego kwantu γ [1].

- σ_c^e – całkowity przekrój czynny dla zjawiska Comptona,

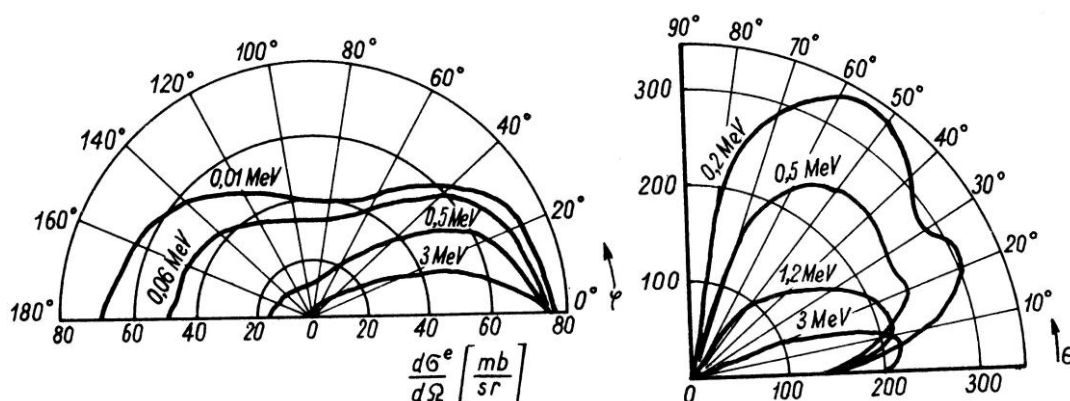
- σ_{abs}^e – przekrój czynny na elektron dla absorpcji energii w zjawisku Comptona,
- σ_{rozpr}^e – przekrój czynny na elektron dla rozproszenia energii w zjawisku Comptona.

Różniczkowy przekrój czynny dla rozproszenia kwantów γ na elektronie został wyprowadzony w oparciu o mechanikę kwantową przez Kleina i Nishinę (1928):

$$d\sigma = \frac{r_0^3}{2} \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \left(\frac{f_0}{f} + \frac{f}{f_0} - \sin^2 \varphi\right) d\Omega \quad (2)$$

gdzie:

- $r_0 = 2,28 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ – klasyczny promień elektronu,
- f_0 – częstość pierwotnych promieni γ ,
- f – częstość rozproszonych promieni γ , zależna od kąta rozproszenia γ .
- $d\sigma$ – różniczkowy przekrój czynny równa się liczbowo prawdopodobieństwu tego, że przy przejściu kwantu γ przez absorber zawierający 1 elektron na 1 cm^2 nastąpi rozproszenie w element kąta bryłowego, $d\Omega$, pod kątem φ względem kierunku pierwotnego.



Rysunek 3. Lewy panel: przedstawione w układzie biegunowym różniczkowe przekroje czynne dla zjawiska Comptona. Widać, że ze wzrostem energii kwantów pierwotnych zwiększa się liczba kwantów rozproszonych pod małymi kątami. Prawy panel: rozkład kątowy elektronów odrzutu w zjawisku Comptona dla różnych energii kwantów pierwotnych. Źródło [1].

Różniczkowy przekrój czynny dla elektronów obliczony w oparciu o równanie (2), którego nie zamieszczamy tutaj, ma dość skomplikowaną postać (patrz [1], str. 65).

Zależność energii kwantów gamma od kąta rozproszenia w efekcie Comptona

Energia fotonu (cząstki o masie spoczynkowej równej zero) wynosi $E = pc$, z drugiej strony wiadomo, że energia fotonu może być zapisana jako $E = hf$, gdzie f jest częstością. Zatem pęd fotonu jest równy:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (3)$$

Energia kwantów rozproszonych w efekcie Comptona zależy od kąta rozproszenia θ i wyraża się wzorem:

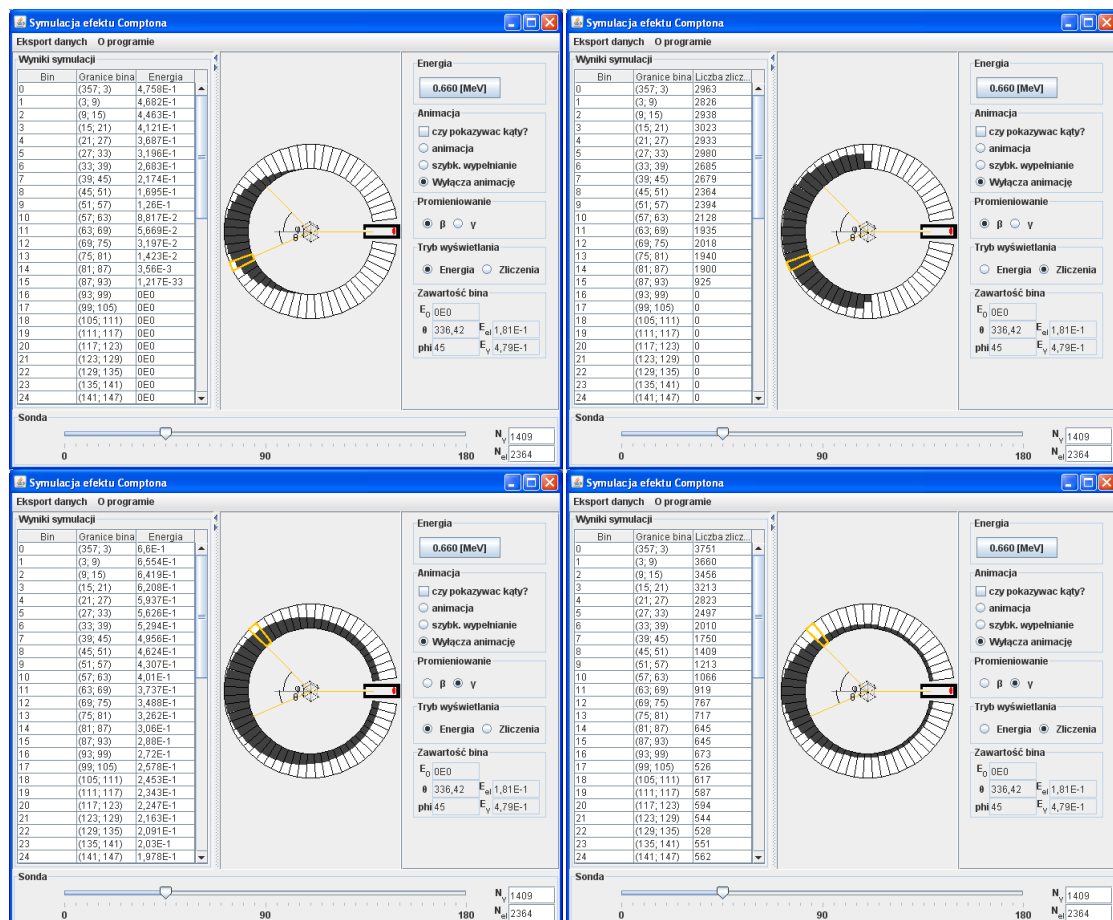
$$E_{k'} = \frac{E_k}{1 + E_k(1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

gdzie E_k i $E_{k'}$ oznaczają wyrażone w bezwymiarowych jednostkach m_0c^2 energie kwantu padającego i rozproszonego.

Przy danej energii kwantów padających na rozpraszacz istnieje jednoznaczny związek pomiędzy energią kwantów rozproszonych i kątem ich wylotu θ . Z kolei zasada zachowania energii wymaga, aby suma energii kwantu rozproszonego i elektronu odrzutu była równa energii kwantu padającego. Wynika stąd, że jeżeli źródło promieniowania emituje mono-

energetyczne kwanty γ , to koincydencjom rejestrowanym przy danym kącie θ odpowiadają elektrony odrzutu o jednakowych energiach. Jeżeli źródło promieniowania emituje kilka monoenergetycznych grup kwantów, to widmo energii elektronów odrzutu powinno zawierać maksima, z których każde odpowiada innej energii kwantów padających. Znając energie elektronów odrzutu, które koincydują z kwantami rozproszonymi pod kątem θ można wyznaczyć energie kwantów rozpraszanych.

Na rysunku 4 przedstawione zostały przekroje czynne dla kwantów gamma i elektronów otrzymane za pomocą apletu symulującego efekt Comptona.



Rysunek 4. Wyniki symulacji rozkładów kątowych energii (z lewej strony) i przekroju czynnego (z prawej strony) w efekcie Comptona dla kąta 45° Górna część rysunku dotyczy promieniowania beta, dolna - gamma.

3. Wykonanie ćwiczenia

Celem tego ćwiczenia jest pomiar rozkładów kątowych rozproszonych kwantów emitowanych ze źródła ^{137}Cs o energii padającego promieniowania ok. 660 keV.

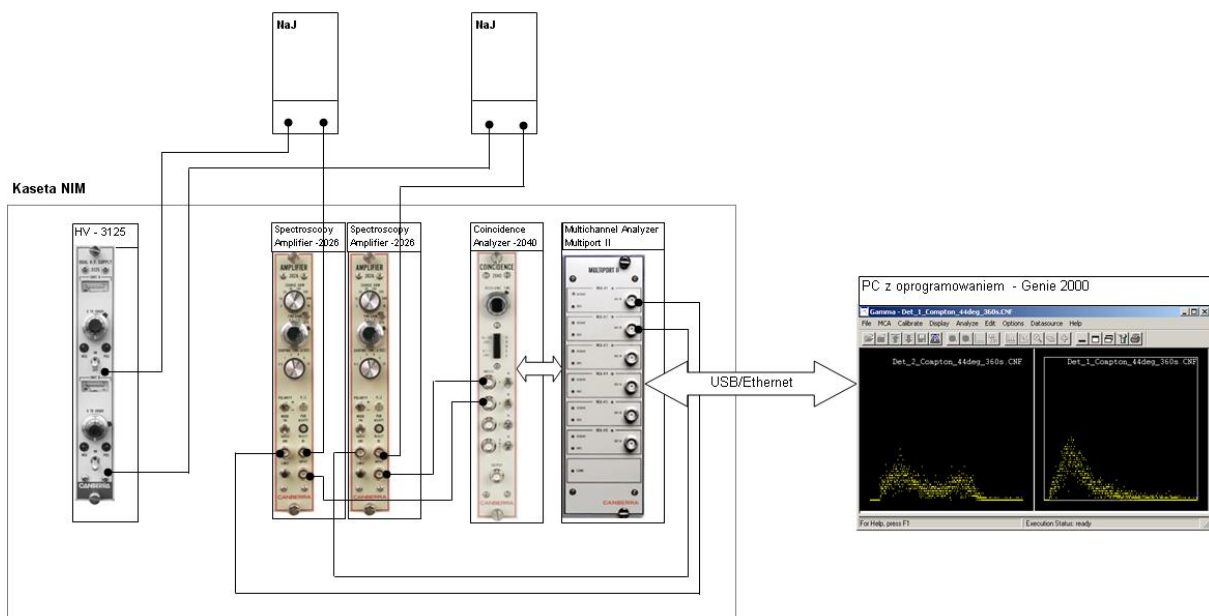
Zadanie polegać będzie na wyznaczeniu widm dla szeregu kątów θ . Położenia maksimów w tych widmach pozwolą wyznaczyć energie kwantów rozproszonych pod odpowiednimi kątami.

Aparatura używana w ćwiczeniu do zbierania pojedynczych widm (rysunek 5):

1. Kaseta NIM-BIN (6,12,24 V), 230 VAC (model 2100-2, 150W 12 miejsc NIM)
2. Detektor NaJ(Tl), 2"x2" (model 802-2x2) – 2sztuki

3. Przedwzmacniacz do det. scyntylacyjnych (model 2007) – 2 sztuki
4. Wzmacniacz spektrometryczny zawansowany (model 2026, kształtowanie Trójkąt/Gauss; PUR/LTC)
5. Podwójny (niezależny) zasilacz wysokiego napięcia 0 – 5 kV, zasilający fotopowielacz w liczniku scyntylacyjnym (model 3125) - układ wykrywający zboczne narastające piku i wysyłający sygnał do przetwornika, sterowany jest za pomocą układu Coincidence
6. Analizator koincydencji (model 2040) - układ wykrywający koincydencję
7. Wielokanałowy 2 torowy analizator amplitudy impulsów (model MP2-2E MultiPort II, Ethernet i USB, 2 wejścia) zawierający 2 niezależne 16K ADC praca w trybie PHA i MCS podwójny moduł NIM, 14-bitowy (w doświadczeniu wykorzystywane jest 11 bitów – zakres energetyczny dzielony jest na 2048 kanałów)
8. Oprogramowanie spektrometryczne (Genie-2000 Basic Spectroscopy – Multi Input)

Dodatkowo potrzebny będzie mechanizm ustawiania kąta położenia sond: w skład układu wejdą potencjometr wieloobrotowy, silnik krokowy i układ sterowania poprzez RS, oraz oprogramowanie aplikacji (diesrae.exe) umożliwiające komunikację z Analizatorem amplitudy poprzez programy typu batch i C/C++.



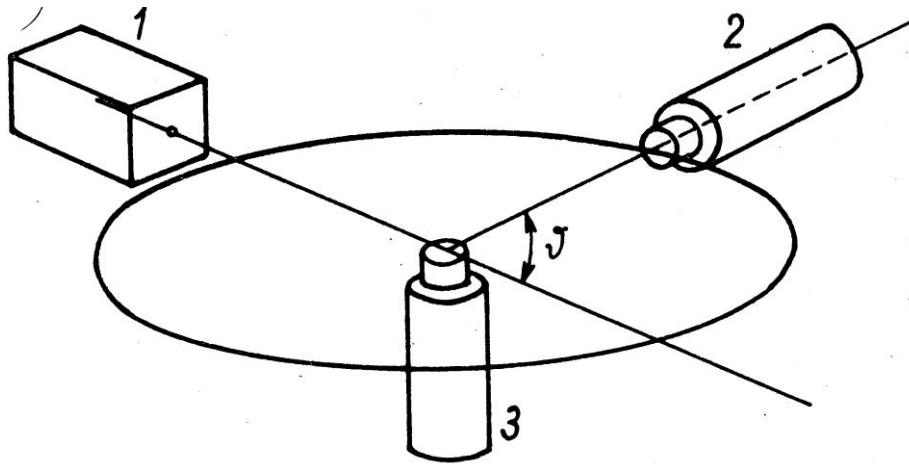
Rysunek 5. Aparatura pomiarowa umożliwia zbieranie pojedynczych widm.

Pomiary wykonuje się za pomocą dwóch detektorów scyntylacyjnych NaJ ruchomego i nieruchomego (patrz rys. 6 i 7).

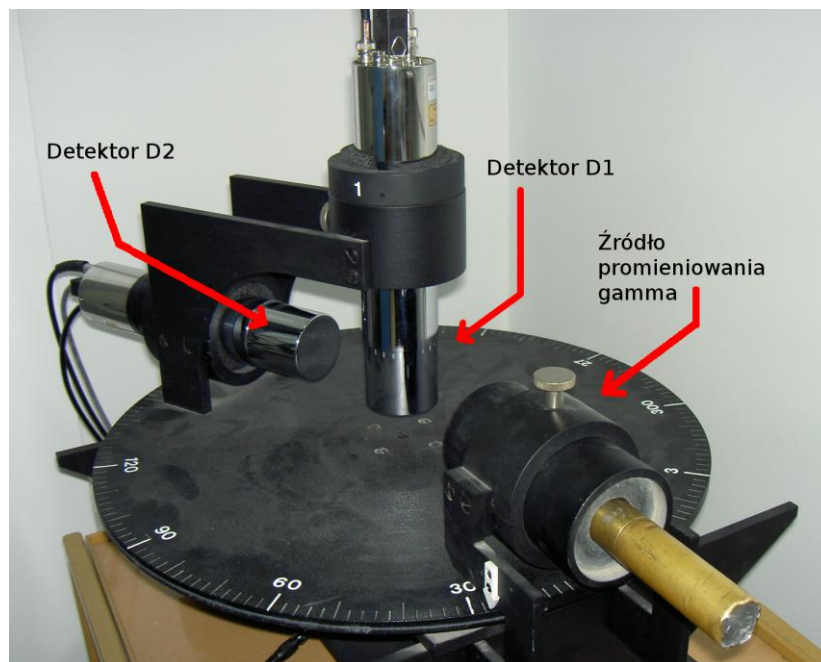
Elektrony Comptonowskie powstające w scyntylatorze (element 3 na rys. 6) wywołują błyski i są rejestrowane przez fotopowielacz, natomiast rozproszone kwanty γ z dużym prawdopodobieństwem mogą opuścić scyntylator. Druga, ruchoma sonda (element 2 na rys. 6) ma za zadanie rejestrować te właśnie kwanty. Obie sondy pracują w koincydencji. Jednoczesne pojawienie się impulsów na wyjściach obu detektorów z wysokim poziomem ufności pozwala uważać koincydencję za akt związany z efektem Comptona. Zastosowanie techniki koincydencyjnej w istotny sposób obniża tło pomiarów.

Idea pomiarów koincydencyjnych

Ich istota polega na tym, by rejestrować tylko jednocześnie (w praktyce w odstępie mniejszym niż tzw. czas koincydencji) pojawiające się na obu detektorach impulsy: impuls na scyntylatorze nieruchomym pochodzący od elektronu komptonowskiego i impuls na scyntylatorze ruchomym pochodzący od rozproszonego kwantu γ .



Rysunek 6. Geometria pomiarów: 1 - pojemnik ze źródłem promieniowania oraz kolimator, 2 - sonda ruchoma, 3 - sonda nieruchoma [1].



Rysunek 7. Zdjęcie mechanicznej części układu wraz z detektorami [2]. W detektorze D1 zachodzi efekt Comptona, rozproszony kwant gamma opuszcza detektor, natomiast elektron zostanie zarejestrowany przez licznik scyntylacyjny. Detektor D2 można obracać wokół detektora D1. Detektory pracują w układzie koincydencyjnym.

Sygnaly z obu liczników scyntylacyjnych trafiają na wejścia wzmacniaczy spektrometrycznych. Każdy wzmacniacz ma dwa wyjścia: analogowe i cyfrowe.

Na podstawie sposobu narastania wzmacniacz identyfikuje pochodzący ze scyntylatora impuls. Jeśli impuls zostanie zidentyfikowany jako pochodzący odżądanego zjawiska, nastę-

puje dalsza obróbka sygnału. Przez wejście cyfrowe do detektora koincydencji trafia sygnał mówiący o tym, że w danym detektorze zaobserwowano scyntylację. W tym samym czasie wzmacniacze zwiększają amplitudy rejestrowanych pików i nadają im korzystniejszy dla dalszej obróbki kształt, a następnie sygnały (analogowe) są kierowane do przetwornika Multiport A/D.

W detektorze koincydencji podejmowana jest decyzja czy koincydencja zaszła czy nie – różnica w czasie między wystąpieniami pików na obu detektorach musi mieścić się w przedziale zwanym czasem koincydencji. Jeśli koincydencja zaszła, to do przetwornika A/D wysyłana jest informacja o tym i przetwarzane są sygnały analogowe pochodzące ze wzmacniaczy. Sygnał z przetwornika A/D przesyłany jest do komputera klasy PC. Zebrane dane analizowane są za pomocą dedykowanego oprogramowania.

Wykonanie pomiarów

Aparatura pomiarowa jest obsługiwana za pomocą dedykowanego oprogramowania (aplikacja **dieslrae.exe**) dostępnego na stanowisku pomiarowym.

Pomiary z preparatem ^{137}Cs należy wykonywać dla kątów θ : 45°, 60°, 90°, 120°, 140°. Ze względów technicznych zmieniając położenie ruchomej sondy należy wprowadzać ujemne wartości kątów.

Aby wykonać pomiary dla danego kąta, należy:

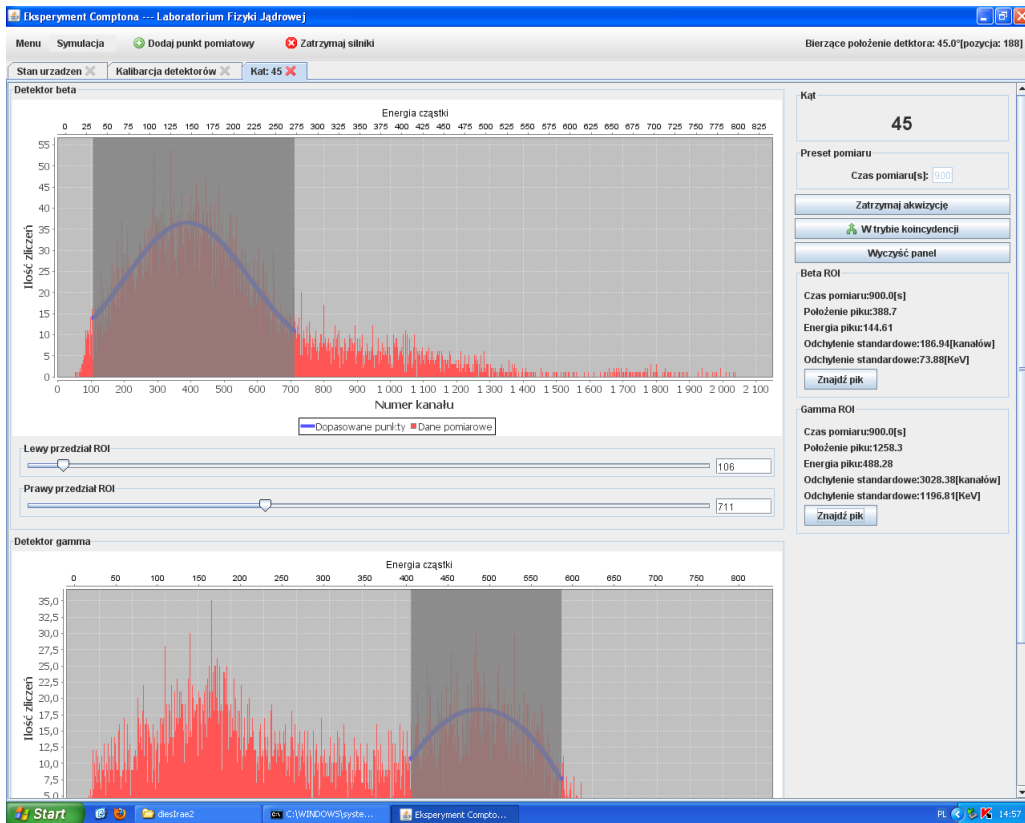
1. Z menu programu (patrz rysunek 8) wybrać polecenie **Dodaj punkt pomiarowy** i ustawić odpowiednią wartość kąta (np. -45°). Na ekranie pojawi się dodatkowa karta zatytułowana **Kat: 45**.
2. W menu znajdującym się po prawej stronie aktywnego okna ustawić czas pomiaru. Domyślną wartością jest 600 sekund. Czasu tego nie należy zmniejszać, można go, ewentualnie, wydłużyć, aby uzyskać lepszą jakość wyników.
3. Upewnić się czy pomiary będą dokonywane w trybie koincydencji (w menu bocznym widoczna jest opcja **W trybie koincydencji**).
4. Rozpocząć pomiary poprzez kliknięcie na przycisku **Start akwizycji**.

Uwaga: Po zakończeniu każdego pomiaru należy wyeksportować uzyskane wyniki pomiarów do zewnętrznego pliku arkusza kalkulacyjnego (plik w formacie *.xls).

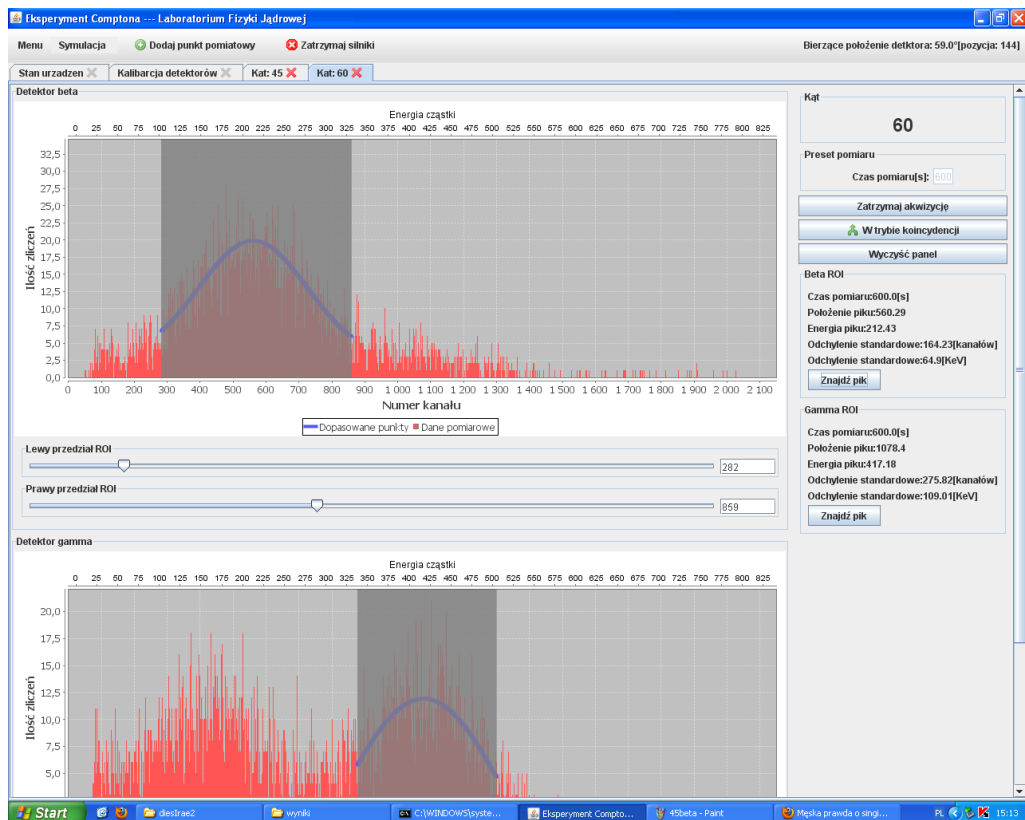
Po zakończeniu pomiarów na ekranie dostaniemy rozkłady (zliczenia w zależności od numeru kanału) rozproszonego promieniowania beta oraz promieniowania gamma. Oprogramowanie umożliwi dopasowanie funkcją Gaussa pików rozkładu doświadczalnego, z którego uzyskamy informację o energii.

Aby uzyskać informacje o położeniu maksimum pików oraz odpowiadającej mu energii należy (patrz rysunek 8):

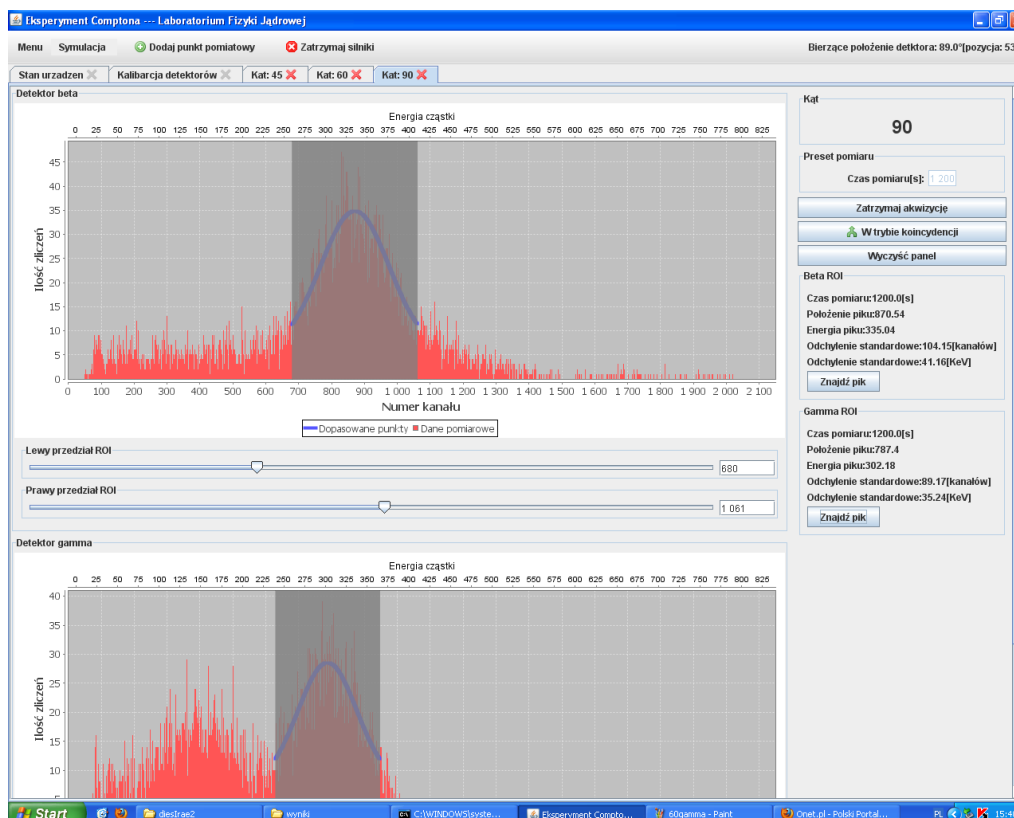
1. Za pomocą suwaków (**Lewy przedział ROI**, **Prawy przedział ROI**) znajdujących się poniżej wykresu określić położenie pików promieniowania beta, a następnie w prawej części okna wcisnąć przycisk **Znajdź pik**.
2. Spisać uzyskane parametry.
3. Powtórzyć czynności dla pików promieniowania gamma.



Rysunek 8. Okno aplikacji **diesIrae** z wynikami pomiarów dla kąta 45°. Piki w górnej części rysunku odpowiada energii rozproszonych elektronów. Piki widoczny po prawej stronie w dolnej części rysunku odpowiada energii rozproszonych kwantów γ zaś po lewej koincydencjom przypadkowym.



Rysunek 9. Energie elektronów i fotonów zmierzone dla kąta 60°.



Rysunek 10. Energie elektronów i fotonów zmierzone dla kąta 90°.

Z rysunków 8, 9, 10 widać, że wraz ze wzrostem kąta pik odpowiadający rozproszonemu promieniowaniu γ (zarejestrowany na detektorze D2, rys. 7) przesuwa się ku mniejszym wartościom energii, natomiast β (na detektorze D1, rys. 7) ku większym.

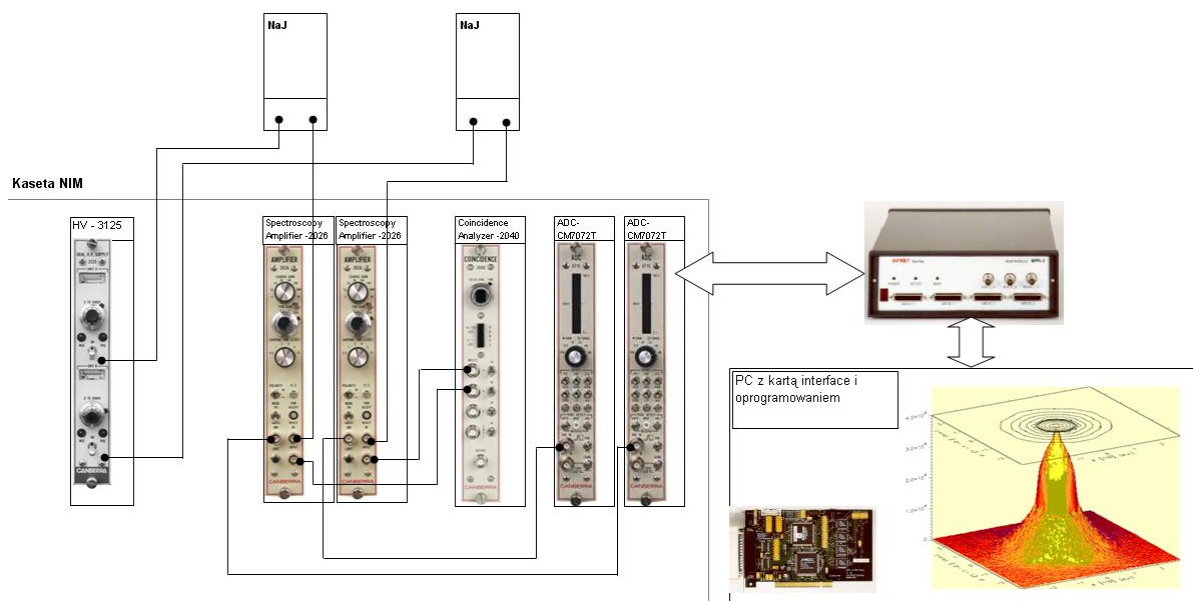
Pomiary dwuparametryczne

Przedstawione powyżej oprzyrządowanie umożliwia zbieranie pojedynczych widm, tj. punkt danych zawiera zliczenie jednego detektora, podczas gdy w urządzeniach wieloparametrycznych punkt danych zawiera zliczenia kilku detektorów. Po zastosowaniu urządzenia dwuparametrycznego w eksperymencie, można wykreślić pomiary z jednego detektora w funkcji pomiarów z drugiego.

Pomiary dwuparametryczne efektu Comptona pozwalają zaobserwować maksimum liczby zliczeń dla sumy energii kwantu γ i elektronu wynoszącej ok. 660 keV.

Aparatura użyta do wykonania pomiarów z wykorzystaniem wieloparametrycznego analizatora amplitudy (rysunek 11):

1. Kaseta NIM-BIN (6,12,24 V), 230 VAC (model 2100-2, 150W 12 miejsc NIM)
2. Detektor NaJ(Tl), 2"x2" (model 802-2x2) – 2sztuki
3. Przedwzmacniacz do detektorów scyntylacyjnych (model 2007) – 2 sztuki
4. Wzmacniacz spektrometryczny zawansowany (model 2026, kształtowanie Trójkąt/Gauss; PUR/LTC)
5. Podwójny (niezależny) zasilacz wysokiego napięcia 0 – 5 kV, (model 3125)
6. Analizator koincydencji (model 2040)
7. CM7072T Podwójny przetwornik ADC/TDC 8K, 500 ns czas konwersji
8. Analizator Multiparametryczny MPA3-2



Rysunek 11. Aparatura pomiarowa umożliwia również zbieranie widm dwuparametrycznych. Po prawej stronie widoczny histogram 3D dla pomiarów dwuparametrycznych. Dla każdego kanału liczby zliczeń z wszystkich serii pomiarowych zostały zsumowane.

4. Uzupelnienia: warunki pomiarów, nastawy przyrządów:

- Energia kwantów γ używanego źródła (Cs o radioaktywności $100 \mu Ci$): $\sim 660 \text{ keV}$.
- Czas koincydencji w trakcie wykonywani pomiarów ustawiony na przedział $(0,5 - 5) \mu s$.
- Zasilanie fotopowielacza: 1 kV .
- Energia wiązania elektronów, na których rozpraszane są kwanty $\sim 2 \text{ eV}$.

5. Literatura

- [1] Janusz Araminowicz, Krystyna Małuszyńska, Marian Przytuła; „Laboratorium Fizyki Jądrowej”; Warszawa 1978, PWN
- [2] Jacek Bzdak; Oprogramowanie ćwiczenia „Badanie efektu Comptona” – praca inżynierska wykonana pod kierunkiem dr. P. Dudy; Warszawa 2009