



ĆWICZENIE

15

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

Pomiar efektu Comptona metodą spektroskopii promieniowania γ

1. Cel ćwiczenia

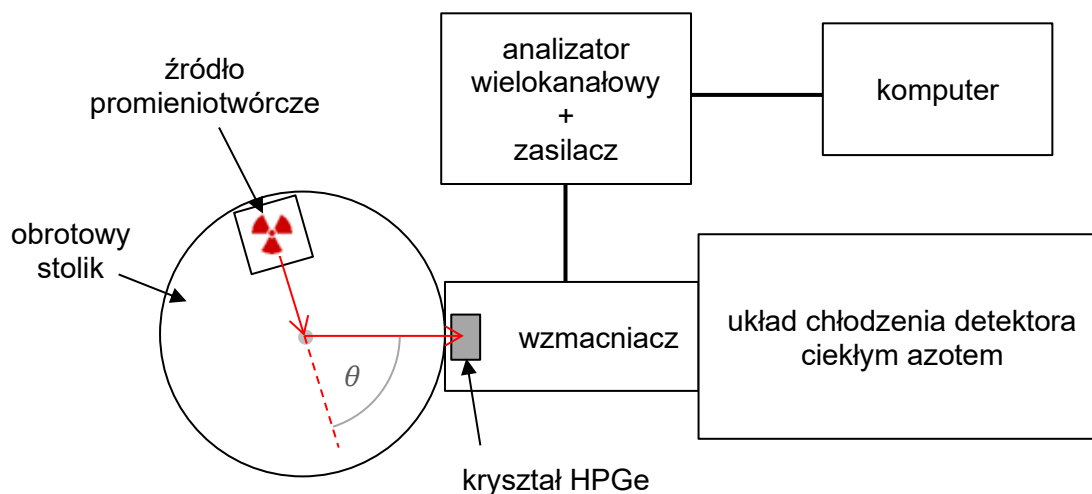
Celem ćwiczenia jest zweryfikowanie hipotezy na temat cząstkowych właściwości promieniowania elektromagnetycznego na przykładzie promieniowania γ na podstawie obserwacji efektu Comptona.

2. Układ doświadczalny

W skład układu eksperymentalnego wchodzi:

- detektor półprzewodnikowy z germanu o wysokiej czystości (HPGe),
- analizator wielokanałowy zintegrowany z zasilaczem wysokiego napięcia,
- kierunkowe źródło promieniowania γ ,
- zdalnie sterowany obrotowy stolik z przeszkodą w centralnej części, od której następuje odbijanie promieniowania γ .

Schemat ideowy geometrii pomiaru ukazany jest na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy układu pomiarowego.

3. Wstęp teoretyczny

1. Oddziaływanie promieniowania γ z materią

Promieniowanie γ padając na przeszkodę oddziałuje z materią na kilka różnych sposobów. W szczególności może to być oddziaływanie z jądrami atomowymi, oddziaływanie z elektronami albo oddziaływanie z polem elektrycznym jąder i elektronów. We wszystkich tych sytuacjach zakłada się, że promieniowanie γ (podobnie jak inne rodzaje promieniowania elektromagnetycznego) można

opisywać jako strumień cząstek posiadających energię i pęd, zwanych *fotonami*. Skutkiem tych oddziaływań mogą być:

- efekt fotoelektryczny, w którym foton przekazuje całą swoją energię elektronowi,
- rozproszenie thomsonowskie na słabo związanym elektronie, w którym foton nie traci energii,
- rozproszenie rayleighowskie na silnie związanym elektronie, w którym foton nie traci energii,
- rozproszenie komptonowskie na słabo związanym elektronie, w którym foton traci część swojej energii,
- tworzenie par elektron-pozyton, w którym energia fotonu jest zamieniana w masę powstających cząstek.

Każde z tych zjawisk zachodzi z różnym prawdopodobieństwem, które zależy m.in. od energii fotonów. Przykładowo tworzenie par jest możliwe jedynie wtedy, gdy energia fotonów przekracza 1022 keV, podczas gdy dla energii rzędu kilkudziesięciu keV dominuje efekt fotoelektryczny.

2. Efekt Comptona

Efekt Comptona jest przykładem rozproszenia, w którym foton zderza się z elektronem słabo związanym w atomie. Dla uproszczenia obliczeń założymy, że przed zderzeniem elektron nie porusza się, czyli jego pęd jest zerowy. Po zderzeniu elektron doznaje odrzutu, a padający foton zmienia kierunek swojego lotu (patrz rys. 2). Zgodnie z założeniami mechaniki relatywistycznej można zapisać zasadę zachowania energii w postaci następującego równania:

$$E + m_e c^2 = E' + \sqrt{p_e^2 c^2 + (m_e c^2)^2} \quad (1)$$

gdzie c to prędkość światła w próżni równa około $3 \cdot 10^8$ m/s, E to energia padającego fotonu, $m_e c^2$ to energia spoczynkowa elektronu, E' to energia rozproszonego fotonu, zaś p_e to pęd elektronu po zderzeniu. Z kolei pęd fotonu p_f można obliczyć znając jego energię E na podstawie prostego wzoru:

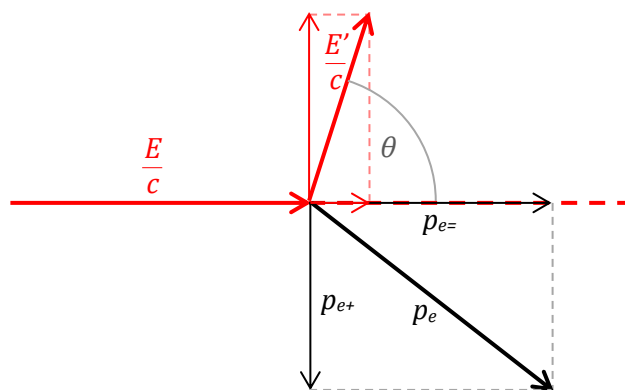
$$p_f = \frac{E}{c} \quad (2)$$

Wiedząc to można zapisać zasadę zachowania pędu, rozpisując ją niezależnie dla składowych równoległych do kierunku padającego fotonu (patrz rys. 2):

$$\frac{E}{c} = \frac{E'}{c} \cos \theta + p_{e+} \quad (3)$$

i prostopadłych do tego kierunku:

$$0 = \frac{E'}{c} \sin \theta + p_{e-} \quad (4)$$



Rys. 2. Rozkład pędów podczas rozpraszania fotonu na swobodnym elektronie.

Wiadomo także, że całkowity pęd elektronu po zderzeniu można obliczyć ze wzoru:

$$p_e^2 = p_{e-}^2 + p_{e+}^2 \quad (5)$$

Podstawiając do tego równania odpowiednie wartości p_{e-} i p_{e+} obliczone z równań (3) i (4) oraz mnożąc przez c^2 otrzymuje się wielkość:

$$p_e^2 c^2 = E'^2 + E^2 - 2 \cdot E \cdot E' \cdot \cos \theta \quad (6)$$

którą można też obliczyć na podstawie równania (1):

$$p_e^2 c^2 = 2 \cdot E \cdot m_e c^2 - 2 \cdot E' \cdot m_e c^2 - 2 \cdot E \cdot E' \quad (7)$$

Porównując równania (6) i (7) można wyprowadzić wzór na energię fotonu po rozproszeniu:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (8)$$

3. Hipoteza

W ćwiczeniu mierzone będą energie fotonów rozproszonych na przeszkodzie pod znanym kątem θ , zarówno tych, które rozproszyły się sprężysto i zachowały pierwotną energię E , jak i tych, które na skutek efektu Comptona zmieniły swoją energię na E' . Jeśli powyższy opis teoretyczny jest prawdziwy, to zmierzone wielkości θ , E i E' powinny spełniać równanie (8). Co więcej, znając te wielkości można będzie obliczyć wartość energii spoczynkowej elektronu $m_e c^2$.

4. Przebieg doświadczenia

⚠ Uwaga! Wszelkie operacje ze źródłami promieniowania przeprowadza obsługa laboratorium!

- A) Uruchomić układ pomiarowy oraz komputer zgodnie z opisem dołączonym do stanowiska.
- B) Jeśli to konieczne, wykonać kalibrację energetyczną detektora zgodnie z dołączonym opisem.
- C) Ustawić obrotowy stolik w pozycji odpowiadającej kątowi θ równemu 180° .
- D) ⚠ Umieścić w odpowiednim miejscu stolika źródło promieniotwórcze i zabezpieczyć je przy pomocy dodatkowych osłon i pokrywy stolika.
- E) Uruchomić nowy pomiar widma promieniowania γ . Czas trwania pomiaru ustalić z obsługą laboratorium.
- F) Po zakończeniu pomiaru znaleźć na otrzymanym wykresie wierzchołek odpowiadający energii promieniowania rozproszonego bez straty energii. Korzystając z dostępnych w programie funkcji odczytać energię odpowiadającą centrum tego wierzchołka i zapisać ją jako wartość E dla danego kąta θ . Odczytać także wartość szerokości połówkowej tego wierzchołka i zapisać ją jako niepewność E .
- G) Znaleźć na wykresie wierzchołek odpowiadający energii promieniowania rozproszonego ze stratą energii w efekcie Comptona. Korzystając z dostępnych w programie funkcji odczytać energię odpowiadającą centrum tego wierzchołka, a także jego szerokość połówkową i zapisać wyniki jako wartości energii E' oraz jej niepewność.
- H) Pomiary widma należy powtórzyć dla kilku różnych ustawień źródła względem detektora, za każdym razem zapisując wartość kąta θ oraz energii E i E' wraz z ich niepewnościami. Liczbę pomiarów oraz zakres kątów ustalić z obsługą laboratorium.
- I) ⚠ Po zakończeniu pomiarów powrócić stolikiem do pozycji początkowej i wyjąć z niego źródło promieniotwórcze.

J) Przekształcić równanie (8) tak, by przypominało równanie linii prostej w postaci $y=ax+b$, gdzie a i b to wielkości niezależne od E' i θ , zaś x i y mogą zależeć od dowolnej kombinacji wielkości E , E' , θ oraz $m_e c^2$. Obliczyć wartości x i y dla wszystkich pomiarów i zrobić wykres zależności y od x . Czy przypomina on linię prostą? Jeśli tak, zaznaczyć na wykresie linię najlepszego dopasowania. Jeśli nie, przedyskutować, jaką linię przypomina wykres oraz co może być tego przyczyną?

K) Na podstawie linii najlepszego dopasowania obliczyć wartości parametrów a i b równania linii prostej. Znając wartości a i b oraz zmierzone wcześniej wartości spróbować obliczyć, ile wynosi $m_e c^2$, czyli masa spoczynkowa elektronu wyrażona w jednostkach energii. Czy obliczona wartość zgadza się z wartościami tablicowymi?

L) Oszacować niepewności pomiarowe obliczanych wielkości x , y , a i b , a także $m_e c^2$. Jak znajomość tych niepewności wpływa na wnioski?

M) Na podstawie zmierzonych widm promieniowania γ przedyskutować kształt wierzchołków odpowiadających energiom E i E' pod kątem różnic między nimi. Jakie mogą być przyczyny tych różnic? Jak wpływa to na wnioski z eksperymentu?

N) Po zakończeniu ćwiczenia wyłączyć układ pomiarowy zgodnie z dołączonym opisem.