

Ćwiczenie J14 - Pomiar zasięgu, rozrzutu i zdolności hamującej cząstek alfa w powietrzu

2 października 2024

1 Przebieg ćwiczenia

1.1 Wstęp

Badanie oddziaływania naładowanych cząstek z materią mają swoje źródła w początkach fizyki jądrowej i zostały rozpoczęte niemal natychmiast po odkryciu ich emisji z radioaktywnych źródeł. Zrozumienie tych oddziaływań było niezbędne dla rozwoju metod detekcji cząstek i podstawowych badań fizyki jądrowej. W pomiarach tego typu badamy przede wszystkim zależność zasięgu i rozrzutu zasięgu od energii cząstki, a także zdolność hamującą ośrodka i właśnie te wielkości będą wyznaczane w ćwiczeniu. Punktem wyjścia jest metoda zawarta w załączonej publikacji [1], którą postaramy się powtórzyć.

1.2 Zagadnienia do przygotowania

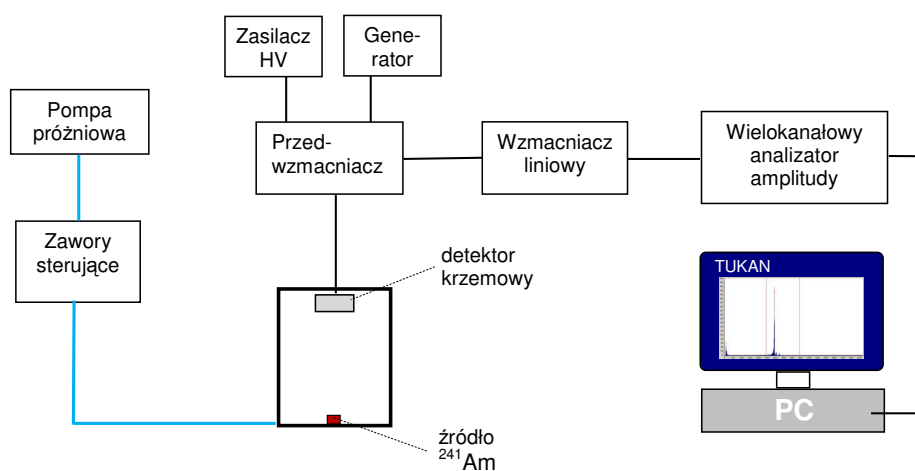
1. Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych z materią
 - a) straty energii na jonizację, wzór Bethego-Blocha, zależność od energii i ładunku cząstki oraz ośrodka
 - b) kształt zależności strat energii od drogi przebytej w materiale (krzywa Bragga)
 - c) zależność średniej energii i jej rozmycia od drogi przebytej w materiale
 - d) zasięg ciężkich cząstek naładowanych
 - e) rozrzut zasięgu
2. Detekcja cząstek naładowanych przy użyciu detektora półprzewodnikowego. Budowa i zasady działania elementów układu:
 - a) detektora krzemowego z barierą powierzchniową
 - b) przedwzmacniacza ładunkowego
 - c) wzmacniacza liniowego
 - d) wielokanałowego analizatora amplitudy sygnałów

3. Statystyka pomiarów

- a) niepewność określenia liczby zliczeń
- b) niepewność określenia średniej energii cząstek

4. Zapoznaj się z publikacją [1]. Zastanów się w jaki sposób zmieniamy grubość warstwy powietrza (odległość źródła od detektora). W jakim zakresie jest ona mierzona? Dlaczego taka metoda została wybrana?

1.3 Wykonanie ćwiczenia



Rysunek 1: Schemat układu pomiarowego.

1. Zapoznanie się z układem pomiarowym: regulacją ciśnienia, układem elektronicznym, wielokanałowym analizatorem amplitudy i programem komputerowym
2. Pomiary kalibracyjne detektora półprzewodnikowego
3. Pomiar kalibracyjny czujnika ciśnienia
4. Pomiar widm energetycznych cząstek α przy różnych ciśnieniach

1.4 Analiza danych i raport

Kroki analizy danych

1. Kalibracja energetyczna detektora półprzewodnikowego
2. Kalibracja czujnika ciśnienia
3. Wyznaczenie zasięgu cząstek alfa
4. Wyznaczenie energii cząstek alfa w funkcji grubości warstwy powietrza

5. Wyznaczenie zdolności hamującej w funkcji grubości warstwy powietrza
6. Wyznaczenie rozrzutu zasięgu w funkcji grubości warstwy powietrza
7. Porównanie osiągniętego wyniku z danymi literaturowymi i dyskusja

Informacje o zdolności hamującej i oczekiwanym zasięgu cząstek α można znaleźć np. tutaj:

<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>

Raport z pracowni, jak każdy utwór, powinien być napisany poprawnym pod względem ortografii, interpunkcji i gramatyki językiem. Powinien układać się w logiczną całość i napisany tak, aby osoba, która wcześniej nie wykonywała ćwiczenia, potrafiła zrozumieć sens i cel zadania.

Oznacza to, że musi on zawierać wstęp, w którym pokrótce zostanie wprowadzona tematyka zadania, oraz przedstawiona metoda i cel badania. W głównej części, powinna być opisana procedura pomiarowa oraz sposób analizy danych. Niezwykle istotnym elementem są tu wykresy i schematy, które powinny posiadać czytelnie opisane osie, legendy i tym podobne elementy.

Nie jest konieczne szczegółowe przedstawianie każdego elementu układu pomiarowego, jeżeli jest to powszechna wiedza (podręcznikowa), ale należy wybrać kluczowe elementy, specyficzne dla danego eksperymentu lub najbardziej istotne z punktu widzenia wyniku, jego niepewności oraz weryfikowalności. Nie należy przepisywać informacji z instrukcji, ani wyprowadzeń wzorów (z wyjątkiem własnych). W podsumowaniu należy podkreślić osiągnięty wynik, jego zgodność lub nie z oczekiwaniami oraz zawrzeć wyciągnięte wnioski lub sugestie dotyczące metodologii, rezultatu czy innych aspektów.

2 Materiały do przygotowania

Informacje zawarte w tym rozdziale stanowią wstęp do zagadnień wymaganych na kolokwium wstępnym. Nie zawierają wszystkich potrzebnych wiadomości, które należy znaleźć w podanej literaturze. Tekst w ramach zawiera pytania, na które należy odpowiedzieć w ramach przygotowań do wykonania ćwiczenia.

2.1 Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych z materią

Literatura: [2]-1.11, [4]-1.1 lub [5]-2.I

W przypadku oddziaływań promieniowania z materią kluczowy jest podział na cząstki są naładowane i neutralne, oraz masywne i lekkie. Przykładem cząstek bez ładunku i masy są kwanty γ , cząstek masywnych bez ładunku neutrony, cząstek naładowanych i lekkich cząstki β (czyli elektrony) i wreszcie kategoria, którą między innymi reprezentantem są cząstki α , czyli ciężkie cząstki naładowane,

Ten typ cząstek oddziałuje z materią przede wszystkim poprzez oddziaływanie elektromagnetyczne pomiędzy ich ładunkiem, a elektronami w atomach materii. Oddziaływania z jądrami ośrodka, takie jak rozpraszanie Rutherforda lub reakcje jądrowe, są tak rzadkie, że można je pominąć rozważając typowy detektor.

Wnikając do ośrodka cząstka α od razu zaczyna oddziaływać jednocześnie z wieloma elektronami. Odczuwają one przyciągający impuls siły kulombowskiej pochodzący od dodatnio naładowanej cząstki podczas jej pobliskiego przelotu. W zależności od odległości, może ona powodować wzbudzenie elektronu na wyższą powłokę lub oderwanie go od atomu (jonizację). Energia przekazana elektronowi musi pochodzić od energii kinetycznej padającej cząstki i w związku z czym jej prędkość musi się zmniejszyć. Maksymalna energia jaka może być odebrana cząstce o masie M i przekazana elektronowi o masie m_e w pojedynczym zderzeniu to $4Em_e/M$, co w przypadku cząstki α o energii 5 MeV wynosi około 3 keV. Jak widać pojedyncze zderzenie jest w stanie odebrać jedynie niewielki ułamek energii cząstki, a więc jej zatrzymanie wymaga wielu interakcji.

Podstawą działania detektorów jest fakt, że cząstka powoduje powstanie wolnych elektronów. Jeżeli przekazana im energia jest dostatecznie duża, mogą one powodować wtórne akty jonizacji. Tego typu elektrony noszą nazwę elektronów *delta* i w rzeczywistości większość energii cząstki jest przekazywana właśnie w ten sposób. Ich zasięg jest jednak zawsze niewielki w porównaniu z zasięgiem cząstki, więc akty jonizacji zachodzą w pobliżu toru cząstki α .

Zdolność hamująca Zdolność hamująca, zdefiniowana dla danego typu i energii padającej cząstki, oraz materiału hamującego to zmiana energii (dE) wzdłuż odcinka toru lotu cząstki (dx)

$$S = \frac{dE}{dx}.$$

Klasycznym wzorem opisującym zdolność hamującą, lub straty energii ($-dE/dx$) jest wzór Bethego-Blocha

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi r_e^2 m_e c^2 z^2 n}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \delta/2 \right].$$

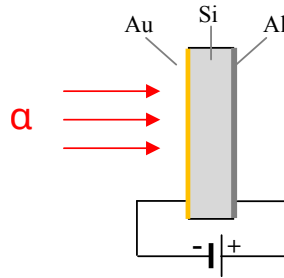
Przybliżenia użyte w wyprowadzeniu tego wzoru przestają działać, kiedy cząstka α ma już na tyle niewielką energię, że możliwe jest wychwytywanie przez nią elektronów ośrodka, które powodują ekranowanie ładunku jądra, aż wreszcie na końcu toru lotu cząstka staje się neutralnym atomem.

Policz prędkość cząstki α o energii 5 MeV w jednostkach c . Dokonaj przybliżeń nierelatywistycznych we wzorze Bethego-Blocha i przekształć go tak, aby zamienić występującą w nim prędkość v na nierelatywistyczną energię kinetyczną E .

Co to jest krzywa Braaga? Jak zdefiniowany jest zasięg cząstki? Dlaczego podlega rozrzutowi?

2.2 Detektory półprzewodnikowe

Literatura: [2]-1.13, [4]-1.3 lub [5]-11.I,11.IV.B,11.VI.A,B



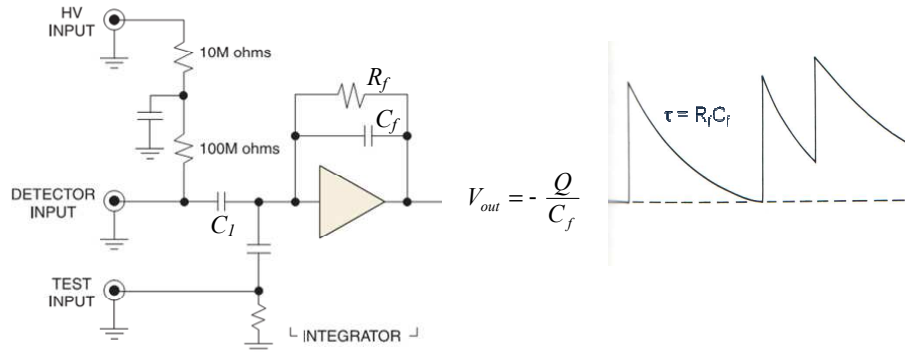
Rysunek 2: Schemat budowy detektora krzemowego z barierą powierzchniową. Złącze Au-Si zostało spolaryzowane w kierunku zaporowym.

Detektor krzemowy z barierą powierzchniową W doświadczeniu do rejestracji cząstek alfa wykorzystywany jest półprzewodnikowy detektor krzemowy z barierą powierzchniową. Rysunek 2 przedstawia schemat budowy takiego detektora. Z jednej strony cienkiej (typowo 50-1000 μm) płytki krzemu typu n napylona jest bardzo cienka (≈ 100 nm) warstwa złota, z drugiej warstwa aluminium. Połączenie Si-Al tworzy złącze omowe czyli złącze, które przewodzi prąd niezależnie od kierunku jego przepływu i zapewnia kontakt elektryczny z półprzewodnikiem. Połączenie Au-Si jest złączem prostowniczym, które przewodzi prąd tylko w jednym kierunku. Po połączeniu Au z krzemem typu n , swobodne

elektrony z Si dyfundują do obszaru złota, co prowadzi do powstania dodatnio naładowanej warstwy na powierzchni Si i ujemnie naładowanej warstwy na powierzchni Au. Obszar ten jest obszarem zubożonym w nośniki prądu elektrycznego. Po spolaryzowaniu złącza w kierunku zaporowym, obszar zubożony w nośniki prądu rozszerza się wypełniając całą objętość półprzewodnika. Pod nieobecność promieniowania jonizującego przez układ nie płynie prąd, ponieważ nie ma jego nośników (swobodnych elektronów lub dziur). Promieniowanie jonizujące przechodzące przez obszar złącza Au-Si powoduje jonizację atomów ośrodka i prowadzi do powstania swobodnych dziur i elektronów - w obwodzie może płynąć prąd i pojawia się impuls o amplitudzie proporcjonalnej do energii zdeponowanej w obszarze złącza. W przypadku krzemu średnia energia potrzebna na wytworzenie pary elektron - dziura wynosi 3.62 eV co oznacza, że np. cząstka alfa o energii 5 MeV tracąc swoją energię w obszarze złącza wytwarza ok. 1.6×10^6 par cząstka-dziura.

Przedwzmacniacz Przedwzmacniacz jest zwykle pierwszym elementem elektronicznym, do którego jest kierowany sygnał z detektora (rysunek 3) i jest umieszczony tuż przy objętości aktywnej. Głównym elementem tego układu jest wzmacniacz całkujący (integrator), który całkuje ładunek wytworzony w detektorze przez rejestrowaną cząstkę jonizującą i daje impuls napięciowy o amplitudzie $V_{out} = Q/C_f$, gdzie C_f to pojemność kondensatora w pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza całkującego. Ważną cechą przedwzmacniaczy ładunkowych jest niezależność wzmocnienia od pojemności detektora.

Konstrukcja przedwzmacniacza umożliwia podłączenie napięcia polaryzującego detektor (HV). Kondensator C_1 zapewnia sprzężenie zmiennoprądowe (odcięcie stałego napięcia) pomiędzy detektorem i integratorem.

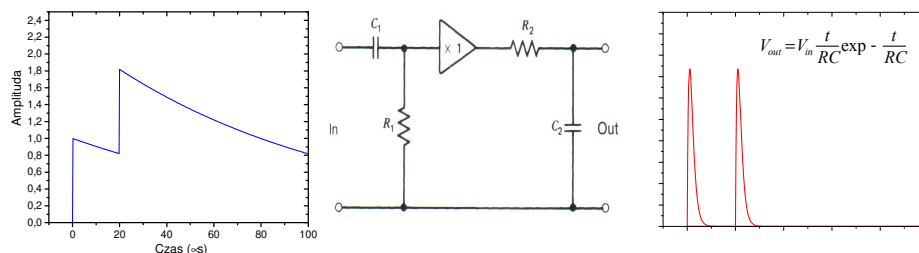


Rysunek 3: Schemat przedwzmacniacza ładunkowego oraz kształt sygnału wyjściowego w przypadku rejestracji trzech cząstek.

Wzmacniacz Wzmacniacz liniowy umożliwia wzmocnienie sygnałów z przedwzmacniacza do amplitudy wymaganej przez następny element układu, czyli wielokanałowy analizator amplitudy. Innym ważnym zadaniem wzmacniacza jest odpowiednie kształtowanie sygnału, eliminowanie efektu nakładania się impulsów oraz filtrowanie wolno i szybkozmiennych szumów obecnych w sygnale z przedwzmacniacza. Funkcje te są najczęściej realizowane poprzez wzmacniacz

różniczkująco-całkujący. Uproszczony schemat jest przedstawiony na rysunku 4. Kondensator C_1 i opornik R_1 tworzą układ różniczkujący z przedwzmacniacza, opornik R_2 i kondensator C_2 - układ całkujący. Wtórnik emiterowy o wzmacnieniu równym 1 separuje stopnie różniczkujący i całkujący wzmacniacza.

Wzmacniacz spektroskopowy powinien charakteryzować się wysoką stabilnością i liniowością wzmocnienia, czyli liniową zależnością amplitudy sygnału wyjściowego od amplitudy sygnału wejściowego.



Rysunek 4: Schemat budowy i działanie wzmacniacza CR-RC i przykładowe sygnały wejściowe z przedwzmacniacza oraz wyjściowy.

Wielokanałowy analizator amplitudy Wielokanałowy analizator amplitudy jest zbudowany z trzech modułów. Są to kolejno:

1. Przetwornik analogowo-cyfrowy (Analog to Digital Converter - ADC), który dokonuje pomiaru amplitudy sygnału i zwraca wynik w postaci cyfrowej. W wielokanałowych analizatorach amplitudy wykorzystuje się ADC wykrywające maksimum impulsu (peak sensing ADC)
2. Układ histogramujący, który zapamiętuje wyniki pomiarów amplitud kolejnych sygnałów i tworzy z nich histogram, czyli strukturę danych przechowującą liczbę zarejestrowanych sygnałów o określonych (dyskretnych) przedziałach amplitudy. Kolejne przedziały histogramu nazywane są kanałami, a cały histogram tworzy widmo.
3. Interfejs użytkownika umożliwiający sterowanie układem pomiarowych (np. start, stop, serie pomiarowe itp.) oraz wykonywanie podstawowych operacji na histogramach (np. zapisywanie danych, znajdowanie linii, kalibrację detektora).

2.3 Własności spektrometrów

Detektory typu spektrometrycznego posiadają szereg własności, których określenie pozwala porównywać je między sobą, oraz wyznaczać fizyczne cechy źródła emitującego promieniowanie.

Energetyczna zdolność rozdzielcza Określa minimalną odległość pomiędzy dwoma liniami promieniowania γ jakie można rozdzielić. Odległość ta jest równa szerokości połówkowej linii. Ponieważ energetyczna zdolność rozdzielcza zmienia się wraz z energią, do celów porównawczych, dla detektorów promieniowania γ przyjęto wyznaczanie stosunku szerokości połówkowej do energii dla

linii 662 keV (emitowanej przez izotop ^{137}Cs) i wyrażanie jej w procentach. Dla spektrometrów α lub β stosowane są inne wzorce.

Wydażność detektora Wydażność detektora to liczba zarejestrowanych kwantów γ w stosunku do wszystkich wyemitowanych przez źródło. Składają się na nią dwa czynniki, geometryczny - określający szansę, że promieniowanie padnie na detektor, zależny od położenia i rozmiaru detektora, oraz wydażność wewnętrzna - prawdopodobieństwo rejestracji pełnej energii dla kwantu padającego na detektor. Korzystając ze źródła o znanej aktywności możemy wyznaczyć wydażność detektora dla różnych energii kwantów γ . Zmieniając odległość źródła kalibracyjnego od detektora można znaleźć jego wydażność wewnętrzną.

Kalibracja energetyczna Układ elektroniczny podłączony do detektora mierzy pewne wielkości (ładunek elektryczny), które następnie są digitalizowane, czyli jest im przypisywany numer kanału w analizatorze. Kalibracja energetyczna pozwala zinterpretować numer kanału jako poszukiwaną wielkość fizyczną, czyli energię promieniowania γ . W najprostszym przypadku jest to zależność liniowa, czyli energię E otrzymujemy ze wzoru

$$E = a_0 + a_1 x$$

gdzie x to numer kanału. Współczynniki a_0, a_1 znajdujemy mierząc położenie znanych linii ze źródeł kalibracyjnych, a następnie dopasowując funkcję $E(x)$. W celu sprawdzenia jakości naszego dopasowania można wykonać rysunek rozbieżności wyników kalibracji od położenia linii w funkcji energii (tzw. residua)

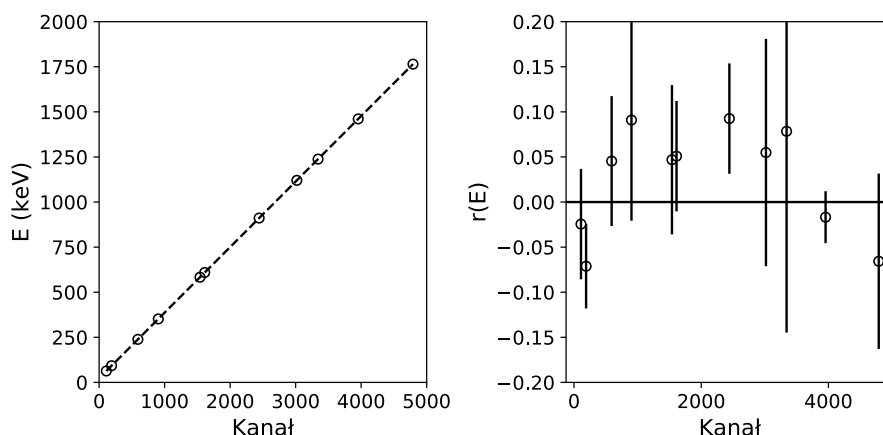
$$r(E) = E_\gamma - E(x_\gamma),$$

gdzie x_γ to numer kanału odpowiadający środkowi linii o energii E_γ . W takim przedstawieniu można na przykład znaleźć regularne odchylenia świadczące o występowaniu w kalibracji wyrazów wyższego rzędu. Wykres przedstawiający położenie linii w funkcji energii zwykle nie pozwala na dokładną ocenę jakości dopasowania, ponieważ odchylenia są niewielkie i trudne do oceny w całej skali energii (rysunek 5).

2.4 Zagadnienia statystyczne

[2]-1.17 lub [5]-3, [8] lub [9]

Rozpad promieniotwórczy jest zjawiskiem, którego natura jest statystyczna. Nie można między innymi przewidzieć momentu zajścia spontanicznego rozpadu, ani kierunku emisji cząstek, które wynikają z kwantowej natury zjawiska. Oznacza to, że mierzone wielkości posiadają pewien rozkład statystyczny niezależnie od precyzji detektorów. Wszelkie procesy, które służą nam do detekcji promieniowania mają podobną naturę. Przykładowo czas życia jądra jest opisany rozkładem eksponencjalnym z charakterystyczną stałą rozpadu (prawdopodobieństwem zajścia na jednostkę czasu). Czas dryfu elektronów do elektrody również jest opisany podobnym rozkładem. Wszelkie procesy wprowadzają zatem do obserwowanych wielkości swoje rozkłady statystyczne, a ostateczny wynik zależy od złożenia wszystkich występujących losowych zdarzeń.



Rysunek 5: Przykład wyniku kalibracji układu pomiarowego, po lewej stronie energia w funkcji kanału, po prawej różnica pomiędzy wynikiem kalibracji, a rzeczywistymi energiami przejść.

Liczba zdarzeń Załóżmy, że mierzymy promieniowanie emitowane ze źródła o okresie połowicznego zaniku znacząco dłuższym od okresu pomiaru (np. okres połowicznego zaniku ^{60}Co to 5.27 roku, a pomiar trwa 5 minut). Można wtedy przyjąć, że aktywność źródła jest stała podczas pomiaru. Nie oznacza to, że powinniśmy za każdym razem oczekiwać tej samej liczby zdarzeń rejestrowanych w detektorze. Będzie ona bowiem zależeć od kilku losowych czynników. Promieniowanie jest emitowane w losowym kierunku, więc istnieje tylko pewne prawdopodobieństwo, że będzie skierowane w stronę detektora. Padające na detektor kwanty mogą, z pewnym prawdopodobieństwem ulec opisanym wcześniej procesom i być lub nie zarejestrowane. Te czynniki są niewielkie i stałe, stąd liczba zarejestrowanych cząstek n jest opisana rozkładem Poissona

$$P(n) = \frac{\mu^n \exp(-\mu)}{n!}.$$

Rozkład tego typu jest opisany pewną średnią liczbą oczekiwanych zdarzeń μ , a odchylenie standardowe obserwowanej liczby zdarzeń $\sigma = \sqrt{\mu}$.

Rejestrowana energia Jeżeli kwant γ padnie na detektor i zostanie całkowicie zaabsorbowany, spodziewamy się, że detektor powinien zmierzyć jego pełną energię. Jednak proces rejestracji zawiera kilka pośrednich etapów - kwant musi przekazać swoją energię elektronowi w procesie fotoelektrycznym, wybity elektron powoduje kolejne akty jonizacji i powstanie par elektron-dziura. Liczba tych ekscytacji, ze względu na pewną gęstość stanów w pasmie przewodzenia, nie musi być ściśle określona i podlega statystycznym fluktuacjom. Każdy kolejny proces taki jak powstawanie fotonów w detektorach scyntylacyjnych lub dryf ładunku w detektorach półprzewodnikowych, a następnie przepływ sygnału przez elementy układu elektronicznego, wprowadza następne niewielkie losowe modyfikacje do ostatecznego rezultatu pomiaru. Suma tych wszystkich drobnych, ale licznych czynników losowych, zgodnie z centralnym twierdzeniem granicznym, powoduje,

że ostateczna odpowiedź układu na kwant γ o bardzo dobrze ustalonej energii jest opisana rozkładem normalnym (Gaussa)

$$P(E) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(E - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

gdzie A to pole powierzchni pod krzywą (interpretowane jako liczba zarejestrowanych kwantów), μ to średnia obserwowana energia, a σ to odchylenie standardowe.

Niepewność pomiaru Niepewność wyniku składa się z dwóch podstawowych części - niepewności statystycznej oraz systematycznej. Wyobraźmy sobie, że mierzymy linijką długość stołu. Powtarzamy pomiar wielokrotnie, aby mieć pewność, że dostaniemy dokładny wynik. Spodziewamy się, że niewielkie różnice pochodzące od wielu czynników (np. kąt ułożenia linijki, kąt odczytu wartości, drżenie ręki itp.) spowodują rozkład normalny wyników. Najlepszą oceną długości stołu będzie średnia z otrzymanych poszczególnych prób, a parametr σ rozkładu ocenimy na podstawie średniego odchylenia standardowego. Nie należy jednak tej wielkości utożsamiać z niepewnością pomiaru długości. Taki wynik osiągniemy w pojedynczym pomiarze. Wykonując serię pomiarów i opisując uzyskany rozkład krzywą Gaussa jesteśmy w stanie określić położenie środka rozkładu (naszą najlepszą ocenę mierzonej wielkości) ze znacznie większą dokładnością, wynikającą z dokładności dopasowania. Zachodzi podobna zależność jak pomiędzy odchyleniem standardowym pojedynczego pomiaru z pewnej populacji

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$$

a odchyleniem standardowym średniej dla próbkę z tej samej populacji

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

W ten sposób powtarzając pomiary możemy ograniczyć wpływ statystycznego rozrzutu wyników. Ale nic to nam nie da, jeżeli nasza linijka będzie nieco krzywa lub źle wyskalowana, albo jej długość będzie zbyt mała. Ten element niepewności to niepewność systematyczna pomiaru, którą również należy zmierzyć lub ocenić (np. poprzez odpowiednią kalibrację przyrządów).

Literatura

- [1] P.J. Ouseph and A. Mostovych, American Journal of Physics 46 (1978) 7
- [2] A. Strzałkowski, "Wstęp do fizyki jądra atomowego", wyd. III, PWN 1978
- [3] C. A. Bertulani, "Nuclear Physics in a Nutshell", Princeton University Press 2007
- [4] A. Hryniewicz "Człowiek i promieniowanie jonizujące", PWN 2001
- [5] G. Knoll "Radiation detection and measurement", wyd. III lub IV, J. Wiley and sons

- [6] C. Leroy, P.-G. Rancoita "Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection", wyd. II, 2009
- [7] C. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments" wyd. II, Springer 1994
- [8] R. Nowak "Statystyka dla fizyków", PWN 2002
- [9] S. Brandt "Data analysis", wyd. IV, Springer 2014
- [10] Chart of Nuclides, www.nndc.bnl.gov/nudat3/