



Szkoła z przyszłością

szkolenie współfinansowane przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego



Narodowe Centrum Badań Jądrowych, ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk

ĆWICZENIE 14b	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ Wzbudzanie fluorescencji przy pomocy promieniowania gamma Data pomiaru: Imię i nazwisko: Imię i nazwisko:
------------------------------------	--

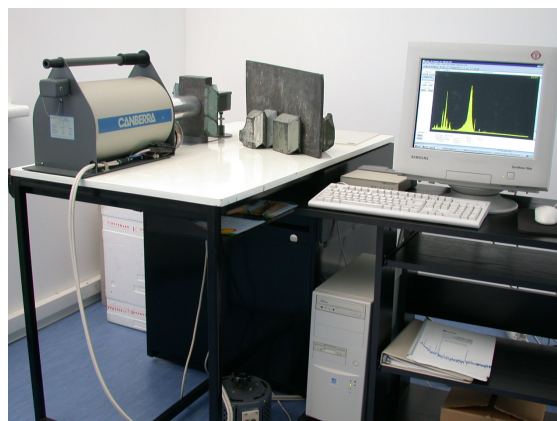
1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z detekcją promieniowania gamma przy pomocy detektora półprzewodnikowego, elementami spektroskopii jądrowej gamma oraz możliwością analizy składu pierwiastkowego substancji na podstawie obserwacji wzbudzonej fluorescencji.

2. UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Zestaw ćwiczeniowy (rys. 1) stanowią:

- detektor z germanu wysokiej czystości (HPGe),
- system akwizycji danych oparty na wielokanałowym analizatorze amplitudy,
- komputer,
- źródło promieniotwórcze ^{152}Eu (informacje o źródle promieniotwórczym w ramce),
- próbki nieznanych substancji.



Rys. 1. Układ pomiarowy

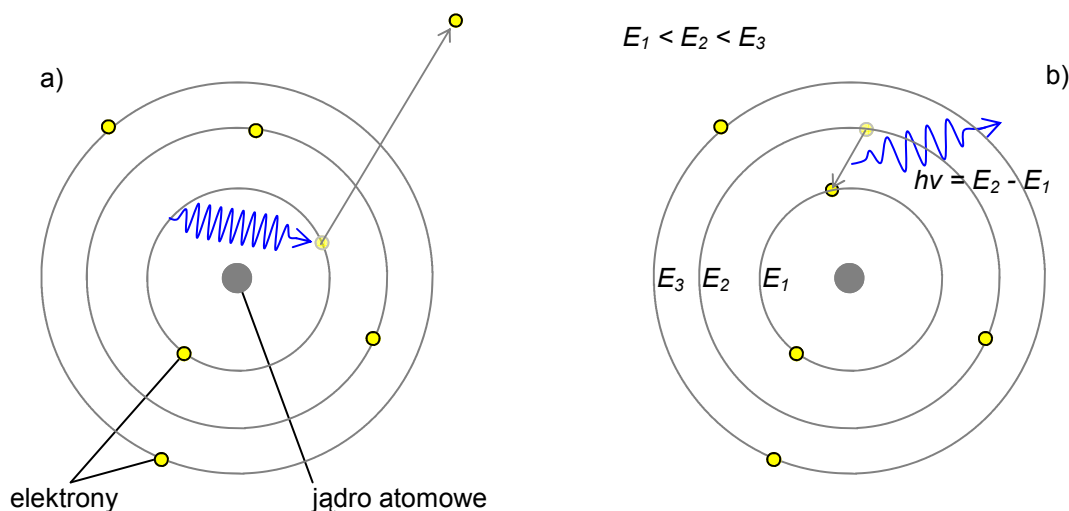
3. WSTĘP TEORETYCZNY

Promieniowanie charakterystyczne atomów.

Atom składają się z jądra atomowego oraz elektronów krążących wokół niego obsadzających poziomy o określonej energii. Poziomy te mają strukturę dyskretną, co oznacza, że zmiany energii następują określonymi porcjami, a nie w sposób ciągły. I tak do przeskoczenia z poziomu o energii niższej na poziom o energii wyższej trzeba elektronowi dostarczyć odpowiednią porcję energii, natomiast przy sytuacji odwrotnej dokładnie taka sama energia jest uwalniana w postaci promieniowania elektromagnetycznego.

Ponieważ energie wiązania zależą od ładunku jądra, poziomy energetyczne, a co za tym idzie także promieniowanie danego atomu, zależy od jego liczby porządkowej Z . Z tego powodu różne pierwiastki można rozróżnić na podstawie promieniowania, jakie emitują. Promieniowanie to nazywamy promieniowaniem charakterystycznym danego pierwiastka. Dotyczy to zarówno promieniowania widzialnego, jak i w szczególności promieniowania z zakresu rentgenowskiego.

Wysokoenergetyczne promieniowanie elektromagnetyczne, jakim jest promieniowanie γ , potrafi dostarczyć do atomu energię wystarczającą do wybijania elektronów całkiem poza atom, czyli do jonizacji. Wybijane elektrony pochodzą z dowolnego poziomu energetycznego, a na ich miejsce spadają elektrony z poziomów wyższych. Najniższe poziomy odpowiadają największej energii zwią-



Rys. 2. Schemat wzbudzenia promieniowania charakterystycznego promieniowaniem gamma:
a) wysokoenergetyczny kwant gamma wybija elektron z powłoki bliskiej jądra jonizując atom,
b) na miejsce wybitego elektronu trafia elektron z wyższej powłoki emitując promieniowanie charakterystyczne o energii $E = h\nu = E_2 - E_1$

zania w atomie i obsadzają je elektrony leżące na powłokach najbliższych jądra, oznaczanych K i L. Gdy ich miejsce zajmują elektrony z powłok o jeden poziom energetyczny wyższych, emitowane promieniowanie oznacza się literą α , zaś gdy o dwa poziomy energetyczne - literą β . Dodatkowe rozszczepienie poziomów energetycznych związane ze spinem elektronów oznacza się liczbami 1 lub 2 w indeksie dolnym. Zapis przyjmuje zatem postać $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$, $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$, $L_{\alpha 1}$, $L_{\alpha 2}$ itd. Dla znaczącej większości pierwiastków energie promieniowania K_{α} i K_{β} są z zakresu od kilku do kilkudziesięciu kiloelektronowoltów (keV), zaś L_{α} i L_{β} od kilku do kilkunastu kiloelektronowoltów, jest to zatem również promieniowanie jonizujące możliwe do zarejestrowania tymi samymi metodami co fotony γ .

Inną przyczyną powstawania promieniowania charakterystycznego może być przemiana jądrowa. W przypadku promieniotwórczego rozpadu jądra, w którym zmienia się liczba protonów (czyli liczba porządkowa Z) nowo powstałe jądro posiada jeszcze przez chwilę niedopasowaną do siebie chmurę elektronową. To niedopasowanie oznacza pobudzenie, które z czasem ustępuje w miarę emisji promieniowania charakterystycznego dla nowego pierwiastka. Dlatego zwykle przemianom jądrowym, nawet nie związanym z emisją kwantów γ , towarzyszą emisje dodatkowego promieniowania rentgenowskiego.

Metody pomiaru widma energii.

Analizator wielokanałowy.

Do pomiaru energii promieniowania elektromagnetycznego stosujemy dwa rodzaje przyrządów:

- takie, gdzie promieniowanie elektromagnetyczne ulega dyfrakcji, wtedy miarą energii jest kąt ugięcia - urządzenie nazywane jest spektrometrem z dyspersją fali - rejestrowane jest promieniowanie ugięte pod określonym kątem;
- takie, gdzie mierzymy energię promieniowania przekazaną materiałowi detektora (najczęściej staramy się zapewnić całkowite zatrzymanie fotonu w danym detektorze). Miarą energii fotonu jest wielkość ładunku wytworzonego przez jonizację materiału detektora - urządzenie nazywane jest spektrometrem z dyspersją energii. Zaletą detektorów tego typu jest jednoczesny (jedno widmo) pomiar wszystkich fotonów z danego materiału.

Każdy system pomiarowy ma swoje parametry, od których zależy jakość (czyli dokładność) naszego pomiaru. Najważniejsze z nich to **mierzona energia, zdolność rozdzielcza, dyspersja i wydajność** detektora.

Typowy zakres **energii** detektora Si(Li) to dla pracy w powietrzu 2-80 keV, dla detektora HPGe o małej objętości 10-300 keV, detektory HPGe o dużej objętości – do 6 MeV. Ograniczeniem dla niskich energii jest pochłanianie i rozpraszanie kwantów γ w okienku przyrządu oraz w powietrzu obecnym pomiędzy źródłem promieniowania a detektorem, ograniczeniem dla większych energii jest

grubość detektora – kwanty o większej energii nie są zatrzymywane w objętości detektora. Parametr ten zależy od materiału detektora oraz jego rozmiarów: grubości oraz powierzchni.

Zrozumiałe jest w takim razie także to, że **wydajność** detektora zależy od energii promieniowania, jakie mierzy. Jeśli jako N_γ oznaczymy liczbę kwantów o danej energii zarejestrowanych w naszym detektorze, a jako I całkowitą liczbę kwantów o danej energii emitowaną ze źródła wzorcowego, to wzór na wydajność przyjmuje postać $\varepsilon = N_\gamma/I$. Dla kryształu Si(Li) wydajność jest bliska 100% przy energiach 10-20 keV, ale wydajność spektrometru zależy też od wielu czynników geometrycznych. Dla kryształu HPGe wydajność dla energii powyżej 1 MeV spada do 0,01%.

Układ spektrometryczny (z dyspersją energii) składa się z dwóch części - właściwego detektora (detektora półprzewodnikowego lub sondy scyntylacyjnej) i tzw. traktu, czyli zestawu kilku przyrządów (tzw. „kostek”) elektronicznych, których zadaniem jest rejestracja, wzmocnienie oraz dalsza „obróbka” sygnału (impulsu) pochodzącego z detektora.

Celem pomiaru jest uzyskanie widma energii badanego promieniowania, czyli podanie liczby zarejestrowanych impulsów w funkcji wartości energii pochłoniętej w detektorze. Typowe widmo promieniowania wizualizowane w dowolny sposób to wykres (x,y), gdzie na osi X podana jest energia E mierzona w odpowiednich jednostkach, a na osi Y liczba impulsów $N(E)$ odpowiadającym kwantom o danej energii. Zanim jednak wynik pojedynczego pomiaru zostanie przeliczony na energię, umieszczany jest w jednej z „szufladek” zwanych kanałami. Zazwyczaj zależność zmierzonej energii od numeru kanału ma postać liniową $E = a + b \cdot k$, gdzie k jest numerem kanału. Energia zarejestrowanego fotonu E_f zostanie umieszczona w „szufladce” (kanale) o numerze $k = (E_f - a)/b$. Stałe a i b konkretnego przyrządu wyznaczamy mierząc standardowe źródła promieniowania o bardzo dobrze znanej energii.

Ponieważ proces przekazywania energii E_0 padającego kwantu czy cząstki do materiału detektora jest procesem dosyć skomplikowanym, zarejestrowane impulsy zajmują pewną liczbę kanałów z centrum w kanale odpowiadającemu energii E_f , tworząc tzw. „linię” lub „pik” w widmie. Przyjmujemy, że linie widma mają kształt podobny do kształtu krzywej dzwonowej, zwanej rozkładem Gaussa.

Istotnym parametrem decydującym o jakości pomiaru jest **zdolność rozdzielcza** (D) naszego układu. Ten parametr to ilość kanałów, $n(E)$, odpowiadająca połowie wysokości piku (FWHM) - od angielskich słów, oznaczających szerokość linii zmierzona w połowie wysokości piku - Full Width at Half Maximum - dla danej energii promieniowania. Można się też odnieść do numeru kanału w maksimum piku $D_k = n(E)$. Parametr D możemy podawać w kanałach albo w jednostkach energii, zazwyczaj podawany jest w elektronowoltach dla energii fotonów emitowanych ze standardowych źródeł - dla półprzewodnikowych detektorów krzemowych linia standardowa to 5,9 keV z rozpadu izotopu ^{55}Mn , dla detektorów germanowych czy sond scyntylacyjnych liniami odniesienia są linie 1172 keV i 1333 keV z rozpadu ^{60}Co .

Zdolność rozdzielcza analizatora zależy zarówno od jakości detektora jak i od jakości traktu („zły” trakt może zepsuć spektrometr z „dobrym” detektorem, a „bardzo dobry” trakt nie uratuje „złego” detektora). Najlepsza zdolność rozdzielcza krzemowych detektorów półprzewodnikowych wynosi ok. 120-140 eV dla energii z zakresu od 3 keV do 10 keV, czyli ok. 2% (140/7000).

Dobra **dyspersja** spektrometru polega na tym, że najmniejsza różnica energii dwóch pików pozwalających się wyraźnie oddzielić, ΔE , jest mała w porównaniu z ich energią E . Mierzona energia E mieści się w K kanałach o szerokości energetycznej E/K każdy. Najczęściej stosujemy 2^n kanałów, gdzie n ma wartości od 8 lub 9 do 15 lub 16, czyli nasze widmo mieści się w 512, 1024 itd. kanałach. W konkretnym pomiarze tak dobiera się wzmocnienie, aby badane linie zajmowały od kilku do kilkunastu kanałów.

Detektor z germanu wysokiej czystości (HPGe).

Gdy na kryształ ultraczystego germanu pada foton, oddziałuje on z kryształem w sposób opisany przez nas wcześniej. W szczególności, elektron wybity w efekcie fotoelektrycznym powoduje przenoszenie elektronów z pasma walencyjnego germanu do pasma przewodnictwa, w wyniku czego pojawia się na wyjściu detektora impuls napięciowy o wysokości proporcjonalnej do energii padającego fotonu. Obserwowana odpowiedź detektora na padający foton ma pewne rozmycie amplitudowe związane ze specyfiką detektora: w wielokanałowym analizatorze amplitudy rejestrujemy niemal

gaussowski pik o pewnej szerokości, nazywany *fotopikiem*. Ponieważ każdy foton wpadający do detektora może w nim ulec rozpraszaniu comptonowskiemu, obserwować będziemy także pewien charakterystyczny rozkład amplitud mniejszych niż w fotopiku, co w sumie tworzy dość skomplikowany kształt odpowiedzi detektora na foton o danej energii. Niezależnie od obu wymienionych tu efektów należy pamiętać, że do „świecenia” pobudzone są również atomy germanu. Typowa energia linii fluorescencyjnej germanu wynosi ok. 11 keV. Jeśli detektor ma niewielką grubość, promieniowanie to ma szansę wydostania się z detektora i wówczas całkowita energia deponowana w detektorze jest pomniejszona właśnie o te 11 keV. Tak więc obok fotopiku obserwować powinniśmy tzw. pik ucieczki, ok. 11 keV poniżej energii fotopiku.

W zestawie doświadczalnym zasilacz wysokiego napięcia podawanego na detektor, wzmacniacz z układem kształtowania impulsu oraz przetwornik analogowo-cyfrowy i analizator amplitudy znajdują się w jednej obudowie. Całość jest sterowana odpowiednim programem komputerowym.

Szerokość połowkowa fotopiku, FWHM, uznawana jest za miarę zdolności rozdzielczej detektora wraz z układem akwizycji danych. Szerokość ta dana jest równaniem:

$$\delta E = \sqrt{R^2(d) + R^2(e)} \quad (1)$$

gdzie $R(d)$ oznacza zdolność rozdzielczą samego detektora, $R(e)$ zaś – wkład elektroniki do całkowitej zdolności rozdzielczej δE . Niestety, $R(d)$ ma ograniczenie od dołu, związane z procesami fizycznymi decydującymi o odpowiedzi detektora. Elektron odrzutu powstający w wyniku oddziaływania fotoelektrycznego traci swoją energię na jonizację germanu. Aby wytworzyć jedną parę elektron-dziura potrzebna jest energia 2,95 eV, tak więc elektron o energii 295 keV wytworzy 100 000 takich par. Proces ten ma naturę statystyczną, w związku z czym liczba ta fluktuuje z charakterystyczną szerokością rozrzutu statystycznego proporcjonalną do pierwiastka z liczby wytwarzanych par, a więc i pierwiastka z energii. Ostatecznie, z dobrym przybliżeniem

$$R(d) = 1,35\sqrt{E} \quad (2)$$

gdzie E i $R(d)$ wyrażone są w elektronowoltach. Tak więc dla energii fotonów 90 keV zdolność rozdzielcza detektora nie może być lepsza niż 405 eV. Ponieważ w obserwacjach profili comptonowskich zależy nam na uzyskaniu jak najlepszej zdolności rozdzielczej, a ta może zależeć od używanego na wyjściu z detektora wzmocnienia oraz parametrów kształtujących impuls, trzeba było by też zbadać zależność zdolności rozdzielczej od wzmocnienia. Choć jest to sprawa intrygująca, nie będziemy – ze względów czasowych – tego robili.

4. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

UWAGA: wszelkie operacje ze źródłami promieniowania przeprowadza obsługa laboratorium!

A) Włączyć zasilanie analizatora wielokanałowego InSpector 2000 przyciskiem po lewej stronie obudowy. Sprawdzić, czy na obudowie detektora świeci się dioda przy napisie „COLD” oznaczająca właściwą temperaturę pracy detektora.

B) Włączyć komputer i po zalogowaniu się uruchomić program "Gamma Acquisition & Analysis". W programie wybrać z menu polecenie „File”→„Open Datasource”, a w otwartym okienku wybrać „Source: Detector” i otworzyć źródło danych „LEGE_16K” (czyli analizator wielokanałowy).

C) Wybrać polecenie „MCA”→„Adjust” i w otwartym okienku przejść do zakładki „HVPS”. Sprawdzić ustawienie napięcia polaryzacji detektora: „Voltage: ¹”. Zaznaczyć „Status: On” i poczekać, aż napis „WAIT” w lewym górnym rogu okienka zniknie. W tym momencie napięcie będzie już przyłożone do detektora.

D) W tym samym okienku wybrać zakładkę „Gain” i sprawdzić ustawienia: „Coarse gain: ”, „Fine Gain: ”, „S-Fine Gain: ”. Po sprawdzeniu zamknąć okienko.

¹ szczegółowe ustawienia aparatury podane zostaną w trakcie wykonywania ćwiczenia

-  **E)** Na stoliku obrotowym umieścić w przygotowanym miejscu źródło promieniowania – ^{152}Eu (europ-152). Obrócić stolik tak, by źródło znajdowało się jak najbliżej detektora (odpowiada to pozycji startowej w programie obsługi stolika) i założyć pokrywę górną.
- F)** W programie przelicznika wybrać polecenie „MCA”→„Acquire Setup”, ustawić czas żywy pomiaru („Live Time”) na ☐ s, sprawdzić ustawienie „Input Size: ☐” i zatwierdzić wszystko przyciskiem „OK”.
- G)** Wyczyścić dane pomiarowe przyciskiem „Clear” i uruchomić pomiar przyciskiem „Start” na panelu po lewej stronie ekranu.
- H)** Po zakończeniu pomiaru wcisnąć przycisk „Expand On” i powiększyć obszar z zarejestrowanym pikiem (maksimum) charakterystycznego promieniowania ^{152}Eu o energii 121,8 keV (najbardziej po prawej stronie wykresu).
- I)** Przyciskami „Prev” i „Next” na dole ekranu zmienić zakładkę „Time Info” na „Marker Info”. Przesuwając markery (lewy i prawy) na wykresie i jego powiększeniu otoczyć nimi pik 121,8 keV. Odczytać wartości „Centroid” (w postaci ‘kanał : energia’) i „FWHM” (‘energia’) i zapisać ich wartości w tabeli jako odpowiednio energię fotonu γ E i niepewność pomiarową tej energii δE .
- J)** Zaznaczyć markerami pozostałe maksima leżące po lewej od wcześniej zmierzonego. Dla każdego odczytywać wartości „Centroid” i „FWHM” i zapisać je w tabeli jako E oraz δE . Notować także orientacyjne wysokości tych pików.
- K)** Korzystając z tablic charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego różnych pierwiastków oraz jądrowego różnych izotopów różnych ustalić pochodzenie pików w zmierzonym widmie.
- L)** Pomiedzy źródłem promieniowania a detektorem umieścić wcześniej przygotowaną próbkę nieznanego materiału. Ponownie przeprowadzić pomiar i odczytać wyniki tak jak w punktach G-K.
-  **M)** Po zakończeniu pomiarów usunąć ze stolika badaną próbkę oraz usunąć i zabezpieczyć źródło promieniowania.
- N)** Po zakończeniu wykonywania ćwiczenia wyłączyć napięcie zasilające detektor. W tym celu wybrać polecenie „MCA”→„Adjust” i przejść do zakładki „HVPS”. Zaznaczyć „Status: Off” i poczekać, aż napis „WAIT” w lewym górnym rogu okienka zniknie. Wtedy można wyłączyć zasilanie analizatora InSpector 2000 oraz zamknąć wszystkie programy i wyłączyć komputer.



DANE O ŹRÓDLE PROMIENIOTWÓRCZYM

^{152}Eu

Energia fotonu [keV]	5,6	6,3	39,5	40,1	45,4	121,8	244,7	344,3	778,9	964,1
Prawdopodobieństwo emisji fotonu (na jeden rozpad) [%]	6,0	5,6	21,0	38,0	14,8	24,4	7,54	26,52	12,94	14,6
Rodzaj emisji γ - jądrowa europu-152 K lub L - rentgenowska charakterystyczna dla pierwiastka powstającego z europu-152	Sm L $_{\alpha}$	Sm L $_{\beta}$	Sm K $_{\alpha 2}$	Sm K $_{\alpha 1}$	Sm K $_{\beta 1}$	γ	γ	γ	γ	γ

