



ĆWICZENIE

14

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

Wzbudzenie fluorescencji rentgenowskiej
przy pomocy promieniowania γ

1. Cel ćwiczenia

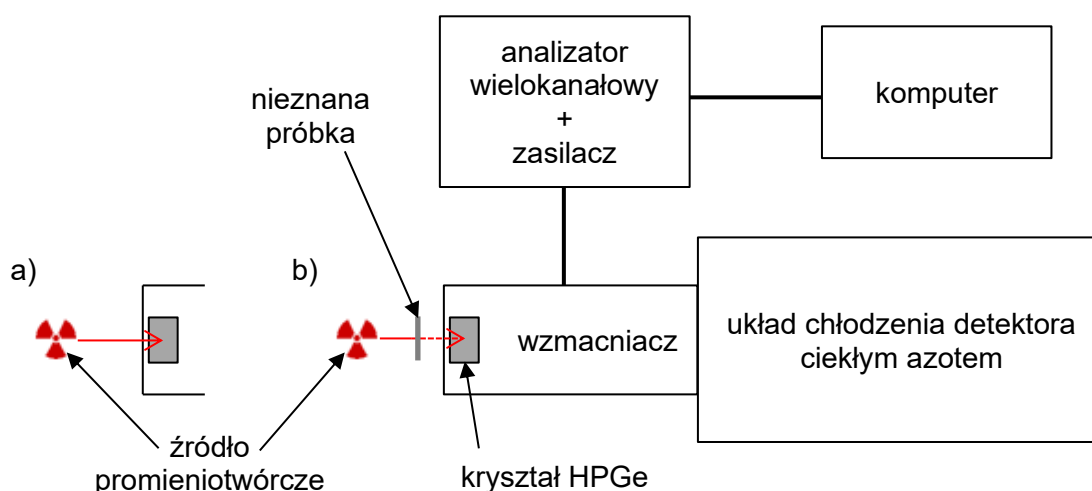
Celem ćwiczenia jest analiza składu pierwiastkowego próbek pobudzanych promieniowaniem γ do fluorescencji w zakresie promieniowania rentgenowskiego. Pozwoli na to analiza widma promieniowania emitowanego ze znanego źródła promieniotwórczego i porównanie go z widmem promieniowania przechodzącego przez badaną próbkę.

2. Układ doświadczalny

W skład układu eksperymentalnego wchodzi:

- detektor półprzewodnikowy z germanu o wysokiej czystości (HPGe),
- analizator wielokanałowy zintegrowany z zasilaczem wysokiego napięcia,
- źródło promieniowania γ ,
- próbki nieznanymi materiałami w postaci cienkich przesłon.

Schemat ideowy geometrii pomiaru ukazany jest na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy układu pomiarowego
podczas pomiaru a) bez próbki, b) z nieznaną próbką.

3. Wstęp teoretyczny

1. Model budowy atomu

Wedle obecnych modeli budowy atomu składa się on z małego jądra atomowego (ok. 100 000 razy mniejszego niż sam atom), w którym skupiony jest ładunek dodatni związany z protonami. Jądro otoczone jest chmurą jeszcze mniejszych (prawie punktowych) elektronów o ładunku ujemnym. Elektrony poruszają się tworząc wokół jądra *orbitale* opisywane *liczbami kwantowymi*. Orbitale

można pogrupować w *powłoki*, a każdą powłokę opisuje wartość energii potencjalnej względem jądra, jaką posiadają elektrony na danej powłoce. Im mniejsza ta energia, tym więcej trzeba dostarczyć energii elektronowi, by wybić go z atomu. Ta energia potencjalna zmienia się w sposób dyskretny, czyli może przyjmować tylko ściśle określone wartości, które zależą od liczb kwantowych, a najbardziej od głównej liczby kwantowej n . Im mniejsza liczba n , tym mniejsza energia powłoki. Liczba n opisuje także, ile elektronów mieści się na danej powłoce, a powłoki oznacza się często kolejnymi literami alfabetu począwszy od K. W szczególności powłoka K odpowiada $n=1$ i mieszczą się na niej 2 elektrony. Jeśli w atomie jest więcej elektronów, to zajmują one kolejne powłoki o coraz wyższych energiach. Powłoka L odpowiada $n=2$ i mieści się na niej 8 elektronów, powłoka M odpowiada $n=3$ i mieści się na niej 18 elektronów itd.

2. Fluorescencja

Padające na atomy fotony promieniowania γ przekazują energię elektronom na powłokach, czego skutkiem mogą być dwa procesy: *wzbudzenie* lub *jonizacja* (patrz rys. 2 a i b).

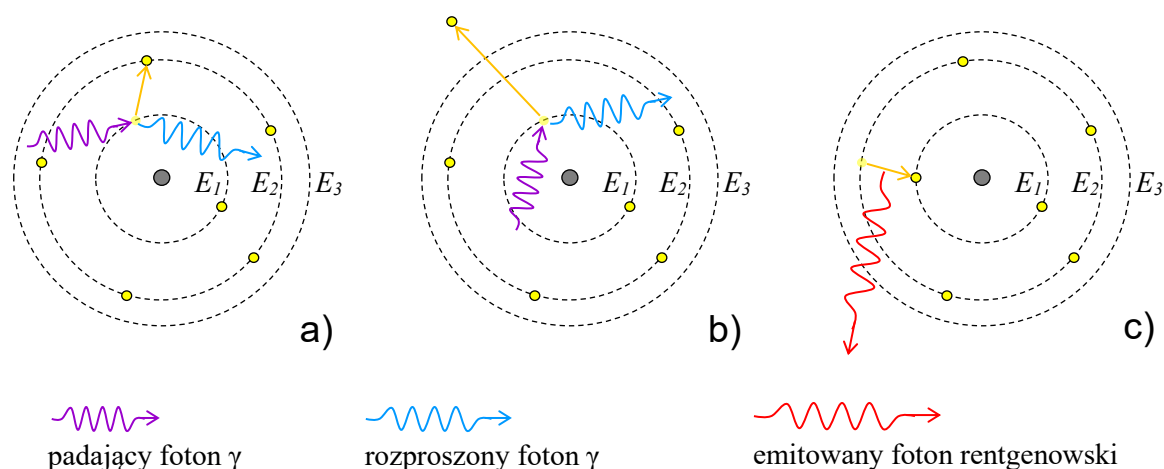
Wzbudzenie polega to na tym, że elektron przeskakuje z powłoki o mniejszej energii na powłokę o wyższej energii. Aby to nastąpiło, przekazana mu energia musi być większa niż różnicy energii obu powłok. Poza tym na powłoce, na którą ma trafić elektron, musi być wolne miejsce dla niego. Istnieją także dodatkowe warunki związane z liczbami kwantowymi i spinem fotonu.

Jonizacja polega na tym, że elektron zostaje całkowicie wybity z atomu. Aby to nastąpiło, przekazana energia musi być większa od energii wiązania tego elektronu na danej powłoce atomowej.

W wyniku obu tych procesów na jednej z powłok powstaje wolne miejsce po elektronie, który uległ wzbudzeniu lub wybiciu. Na to miejsce w krótkim czasie może przeskoczyć elektron z jakiejś innej powłoki, która ma większą energię (patrz rys. 2 c). Często w tej sytuacji emitowany jest foton, który zabiera ze sobą różnicę w energii obu powłok, co wyraża wzór:

$$E_f = E_2 - E_1 \quad (1)$$

gdzie E_f to energia fotonu, E_2 to energia wyższej powłoki, a E_1 to energia niższej powłoki. Zjawisko to nosi nazwę *fluorescencji* (bądź *fosforescencji*, jeśli emisja fotonu następuje z opóźnieniem). Emitowane fotony mogą być z bardzo różnych zakresów promieniowania elektromagnetycznego. Często wykorzystuje się takie substancje, których atomy wysyłają fotony z zakresu światła widzialnego, ale jeśli różnica energii powłok jest odpowiednio duża, może to też być zakres promieniowania rentgenowskiego. Analogicznie do linii w widmie światła widzialnego mówi się wtedy o liniach promieniowania rentgenowskiego charakterystycznych dla danej substancji.



Rys. 2. Model powłok elektronowych w atomie z zaznaczonym schematem a) wzbudzenia, b) jonizacji, c) emisji fotonu.

Linie charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego nazywa się od powłok, pomiędzy którymi przeskakują elektrony. W szczególności K_α oznacza promieniowanie emitowane, gdy elektrony spadają z powłoki L na powłokę K, a K_β oznacza promieniowanie emitowane przez elektrony spadające z powłoki M na K. Podobnie L_α oznacza promieniowanie emitowane podczas przeskoku elektronów z powłoki M na powłokę L, L_β emitowane podczas przeskoku z N na L itd. Dodatkowe liczby umieszczane przy tych symbolach opisują dodatkowe efekty związane z innymi liczbami kwantowymi. Intensywność każdej linii zależy od prawdopodobieństw zajścia przeskoku elektronów, co w ogólności jest dość skomplikowane w obliczeniach, ale zwykle proporcje pomiędzy różnymi liniami dla danej substancji są przewidywalne.

3. Działanie detektora germanowego

Detektor germanowy jest detektorem półprzewodnikowym, w którym padające promieniowanie γ lub rentgenowskie oddaje niewielkie porcje energii słabo związanym elektronom walencyjnym atomów germanu, które dzięki temu stają się elektronami przewodnictwa. Puste miejsca po elektronach zwane *dziurami* można również traktować jak nośniki prądu elektrycznego. Jeśli taki kryształ półprzewodnika jest poddany działaniu silnego pola elektrycznego (np. przez podłączenie wysokiego napięcia), to padające promieniowanie powoduje w nim impulsy prądu elektrycznego, których amplituda zależna jest od energii, jaką promieniowanie zostawi w kryształ. Dzięki temu można wykonać wykres zależności intensywności promieniowania od jego energii (czyli widmo promieniowania), na którym poszczególne wierzchołki (zwane też *pikami* od ang. „peak” – „wierzchołek”) reprezentują najbardziej intensywne linie promieniowania.

W germanie, w którym energia potrzebna do wytworzenia jednej pary elektron-dziura wynosi 2,95 eV, foton o energii 29,5 keV powoduje powstanie około 10 000 takich par, a fluktuacje statystyczne tej liczby są rzędu 100. Oznacza to niewielką niepewność pomiarową energii fotonów wynikającą z działania samego detektora i jego dobrą zdolność do rozdzielania fotonów o bliskich energiach, co jest zaletą. Oczywiście jest wiele czynników, które pogarszają te możliwości pomiarowe. Jednym z nich są fluktuacje termiczne, dlatego detektory germanowe wymagają schłodzenia do niskich temperatur (np. przy pomocy ciekłego azotu). Ważna jest także dobrej jakości elektronika, która nie pogorszy znacznie rozdzielczości całego układu pomiarowego. Oprócz tego należy wziąć pod uwagę procesy fizyczne, które dzieją się w samym detektorze i które są nie do uniknięcia.

Pierwszym z nich jest fakt, że fotony mogą stracić część energii jeszcze przed dostaniem się do kryształu na skutek rozproszenia komptonowskiego. Stąd można spodziewać się, że w widmie energetycznym każdemu wierzchołkowi intensywnego promieniowania wylatującego ze źródła będzie towarzyszył szeroki ogon fotonów o niższej energii. Wśród nich, w zależności od kształtu obudowy detektora, jego otoczenia, a także położenia źródła, może wyróżniać się jedna z energii, ale nie jest to żaden faktyczny ślad po promieniowaniu charakterystycznym wylatującym ze źródła.

Drugim procesem fizycznym zakłócającym widmo promieniowania jest sytuacja, gdy fotony tracą część energii już w samym kryształ detektora na skutek wzbudzenia atomów germanu. Atomy te emitują później na skutek fluorescencji fotony, które uciekają poza kryształ, więc zarejestrowana w kryształ energia fotonu jest pomniejszona o pewną wartość, odpowiednią dla atomów germanu. Można zatem spodziewać się, że w widmie energetycznym każdemu wierzchołkowi intensywnego promieniowania wylatującego ze źródła będą towarzyszyły mniejsze wierzchołki zwane *pikami ucieczki*.

4. Hipoteza

Energie poszczególnych powłok są różne dla atomów różnych pierwiastków, więc i energie emitowanych fotonów powinny być różne. Pobudzając różne próbki do fluorescencji można zatem spróbować ustalić jej skład.

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) ⚠ Umieścić w odpowiednim miejscu stolika źródło promieniotwórcze i zabezpieczyć je przy pomocy dodatkowych osłon i pokrywy stolika.
- D) Uruchomić nowy pomiar widma promieniowania γ . Czas trwania pomiaru ustalić z obsługą laboratorium.
- E) Po zakończeniu pomiaru odnaleźć na otrzymanym wykresie możliwie jak najwięcej wierzchołków. Korzystając z dostępnych w programie funkcji odczytać energię odpowiadającą centrum każdego wierzchołka i zapisać ją jako wartość energii E . Odczytać także wartość szerokości połówkowej tego wierzchołka i zapisać ją jako niepewność E .
- F) Na podstawie dołączonych tablic z wartościami energii promieniowania emitowanego przez źródło oraz charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego różnych pierwiastków ustalić, jakie jest pochodzenie promieniowania o każdej zmierzonej energii E .
- G) ⚠ Pomiędzy źródło a detektor wstawić jedną z przygotowanych próbek o nieznanym składzie.
- H) Uruchomić nowy pomiar widma promieniowania γ . Czas trwania pomiaru ustalić z obsługą laboratorium.
- I) Podobnie jak poprzednio po zakończeniu pomiaru odnaleźć na otrzymanym wykresie możliwie jak najwięcej wierzchołków, odczytać wartości ich energii E wraz z niepewnością oraz ustalić możliwe pochodzenie tego promieniowania.
- J) Jak zmieniło się widmo rejestrowanego promieniowania po wstawieniu próbki? Czy wszystkie zmiany można wytłumaczyć zjawiskami opisanymi w tej instrukcji? Jakie zmiany świadczą o obecności konkretnych pierwiastków w próbce? Jakie to pierwiastki?
- K) ⚠ Wyjąć źródło promieniotwórcze z układu pomiarowego.
- L) Po zakończeniu ćwiczenia wyłączyć układ pomiarowy zgodnie z dołączonym opisem.