



ĆWICZENIE

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

15a

Oddziaływanie cząstek β z polem magnetycznym

1. Cel ćwiczenia

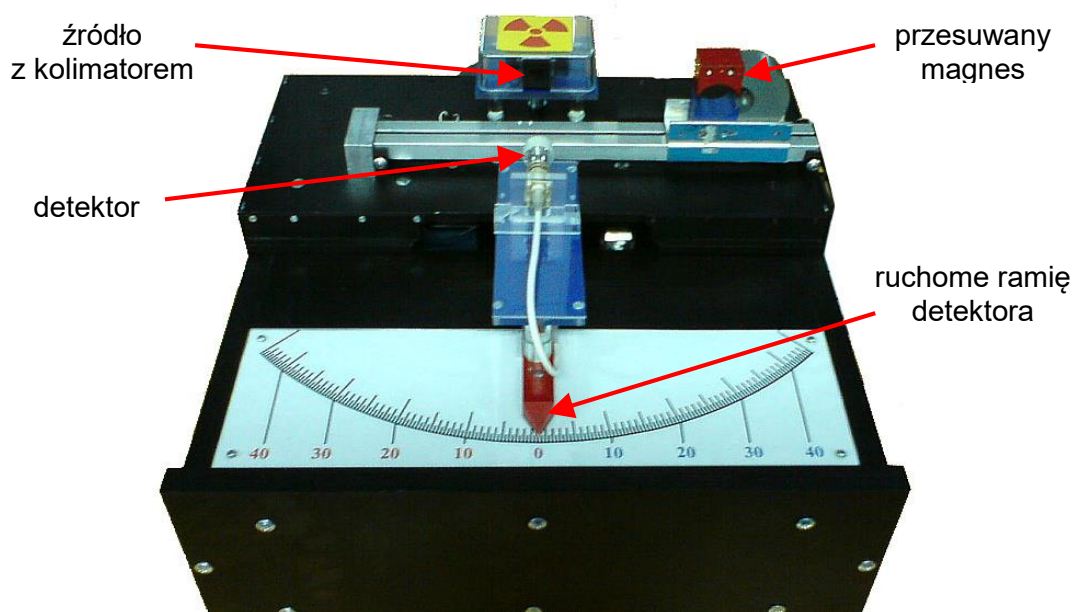
Celem ćwiczenia jest sprawdzenie, jak cząstki β oddziałują z polem magnetycznym oraz wyznaczenie znaku i wartości ładunku elektrycznego tych cząstek pochodzących ze źródła promieniotwórczego używanego w ćwiczeniu.

2. Układ doświadczalny

Zestaw ćwiczeniowy stanowią:

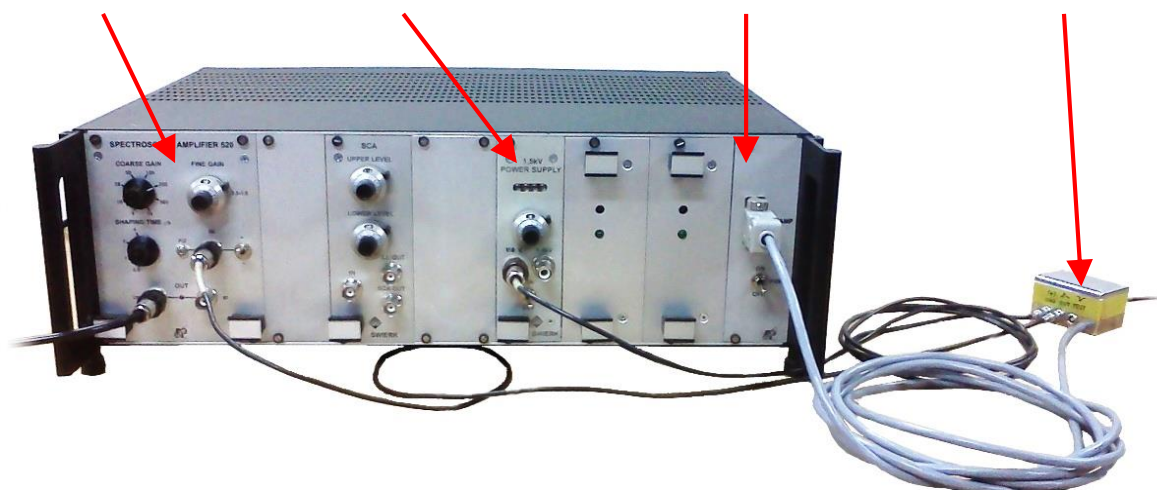
- stół z przesuwającym magnesem i ruchomym ramieniem detektora (rys. 1),
- źródło promieniowania β w osłonie z kolimatorem (rys. 1),
- krzemowy detektor cząstek naładowanych (rys. 1),
- przedwzmacniacz sygnału z detektora (rys. 2),
- zasilacz niskiego napięcia do zasilania przedwzmacniacza (rys. 2),
- zasilacz wysokiego napięcia do polaryzacji detektora (rys. 2),
- wzmacniacz impulsów (rys. 2),
- komputerowy analizator wielokanałowy.

Schemat układu pomiarowego przedstawia rysunek 3.

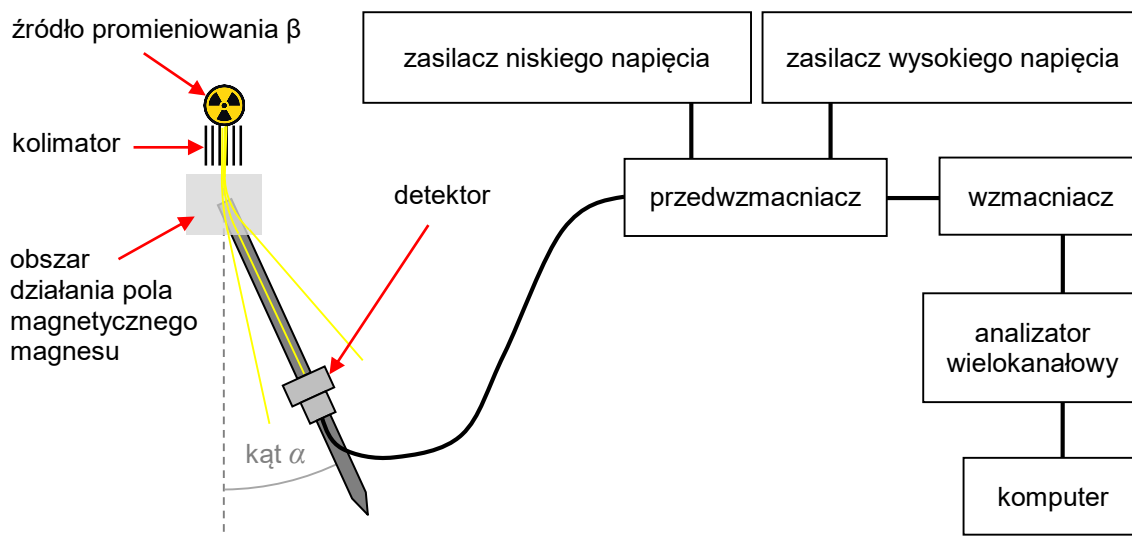


Rys. 1. Stół pomiarowy używany w ćwiczeniu.

wzmacniacz zasilacz wysokiego napięcia zasilacz niskiego napięcia przedwzmacniacz



Rys. 2. Zestaw zasilająco-wzmacniającej i przedwzmacniającej.

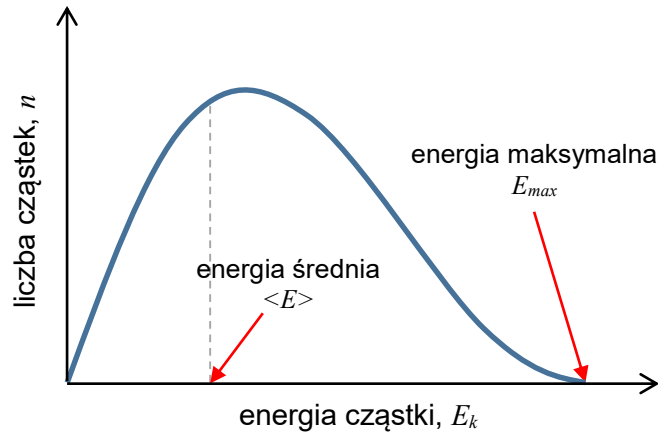


Rys. 3. Schemat aparatury pomiarowej.

3. Wstęp teoretyczny

1. Emisja cząstek β

Cząstki β to elektrony (lub pozytony) emitowane w rozpadzie, w którym wzbudzone jądro atomowe emituje także antyneutrino (lub neutrino) elektronowe. Całkowita energia rozpadu jest w takim przypadku rozdzielana na trzy ciała: cząstkę β , antyneutrino i samo jądro, które doznaje odrzutu podczas emisji oraz przekształca się w jądro innego izotopu. Podczas rozpadu β^- w jądrze jeden z neutronów przemienia się w proton, zaś emitowane cząstki to elektron i antyneutrino elektronowe. Podczas rozpadu β^+ jeden z protonów przemienia się w neutron, zaś emitowane są pozyton i neutrino elektronowe. Energia, z jaką emitowana jest cząstka β , zależy w takim razie od tego, jaką ilość energii przejmą pozostałe dwa ciała: jądro i antyneutrino/neutrino. W praktyce oznacza to, że atomy jednego izotopu β -promieniotwórczego mogą emitować cząstki β o wielu różnych energiach, a rozkład tych energii przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Widmo energetyczne promieniowania β

2. Oddziaływanie cząstek β z polem magnetycznym

Mówiąc o promieniowaniu β myślimy o strumieniach elektronów lub pozytonów. Są to cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym, zatem w polu magnetycznym działa na nie siła Lorentza prostopadła do wektora ich prędkości i wektora indukcji tego pola. Wzór na siłę działającą na cząstkę można zapisać w postaci wektorowej:

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

gdzie q to ładunek cząstki, v to jej prędkość, B to indukcja zewnętrznego pola magnetycznego, zaś symbol \times oznacza iloczyn wektorowy, w którym ma znaczenie kąt między wektorami prędkości i indukcji. Gdy te wektory są do siebie równoległe (czyli gdy cząstka porusza się wzdłuż linii pola magnetycznego), to siła Lorentza wynosi zero. Z kolei największą wartość przyjmuje, gdy te wektory są do siebie prostopadłe i można tę wartość obliczyć ze wzoru skalarnego:

$$F_L = q \cdot v \cdot B \quad (2)$$

Ponieważ wektor siły Lorentza jest zawsze prostopadły do wektora prędkości, to działa ona jak siła dośrodkowa, którą można wyrazić wzorem:

$$F_d = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (3)$$

gdzie m to masa cząstki, zaś r to promień okręgu, jakim jest tor cząstki poruszającej się prostopadłe do linii pola magnetycznego. Porównując równania (2) i (3) można wyprowadzić wzór na ładunek cząstki:

$$q = \frac{m \cdot v}{r \cdot B} = \frac{p}{r \cdot B} \quad (4)$$

gdzie p to pęd cząstki, który można obliczyć znając jej energię kinetyczną E_k . Ze względu na to, że cząstki β emitowane przez źródła promieniotwórcze mogą osiągać energie kinetyczne rzędu MeV (milionów elektronowoltów) i prędkości zbliżone do prędkości światła w próżni, należy w tym celu użyć wzoru relatywistycznego:

$$E^2 = (m_0 c^2)^2 + (p \cdot c)^2 \quad (5)$$

gdzie E to całkowita energia cząstki, m_0 to jej masa spoczynkowa, a c to prędkość światła w próżni, która wynosi około $3 \cdot 10^8$ m/s. Energia całkowita jest sumą energii kinetycznej i spoczynkowej:

$$E = E_k + m_0 c^2 \quad (6)$$

Porównując wzory (5) i (6) można obliczyć, że pęd cząstki zależy od jej energii kinetycznej w następujący sposób:

$$p = \frac{\sqrt{E_k \cdot (E_k + 2 \cdot m_0 c^2)}}{c} \quad (7)$$

co po podstawieniu do równania (4) daje wzór na ładunek cząstki o energii kinetycznej E_k zataczającej w jednorodnym polu B okrąg o promieniu r :

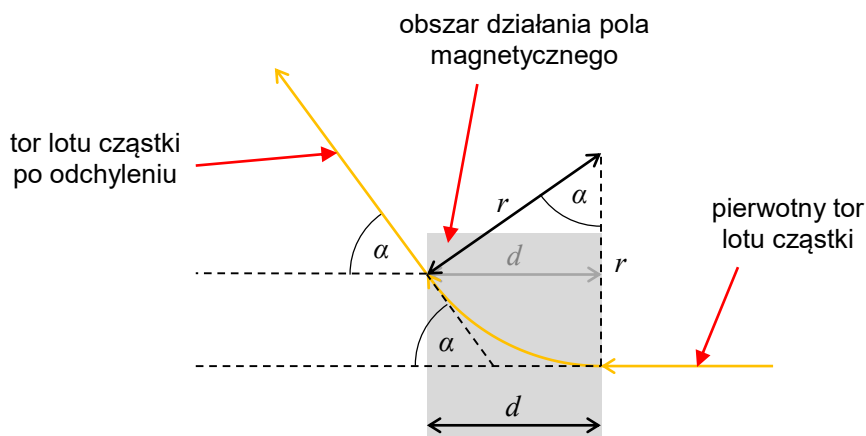
$$q = \frac{\sqrt{E_k \cdot (E_k + 2 \cdot m_0 c^2)}}{r \cdot B \cdot c} \quad (8)$$

Wszystkie te wielkości można zmierzyć lub założyć ich wartość na podstawie danych tablicowych.

3. Wiązka cząstek w polu magnetycznym o ograniczonym obszarze działania

Jeśli pole magnetyczne ma ograniczony obszar działania, to okrąg zataczany przez cząstkę może być większy niż ten obszar. W rzeczywistych sytuacjach indukcja pola magnetycznego będzie płynnie zmieniała swoją wartość na trasie cząstki i tor lotu cząstki będzie skomplikowaną krzywą. Dla uproszczenia rozważań przyjmijmy, że pole jest jednorodne w tym ograniczonym obszarze oraz zerowe poza nim. Tor lotu cząstki nie będzie wtedy pełnym okręgiem, tylko jego łukiem zamkniętym w granicach tego obszaru. Poza nim cząstka będzie poruszała się ruchem prostoliniowym (rys. 5), a zależność pomiędzy kątem jej odchylenia od pierwotnego toru lotu α , długością obszaru działania pola d i promieniem łuku r można zapisać w postaci prostej funkcji trygonometrycznej:

$$d = r \cdot \sin \alpha \quad (9)$$



Rys. 5. Odchylenie cząstki w jednorodnym polu magnetycznym o ograniczonym obszarze działania.

4. Detektor półprzewodnikowy i analizator wielokanałowy

Do detekcji promieniowania β w ćwiczeniu służy krzemowy detektor półprzewodnikowy, w którym w wyniku oddziaływania padającej cząstki z atomami krzemu powstaje ładunek elektryczny proporcjonalny do jej energii kinetycznej. Ładunek ten ma postać par elektron-dziura, a wskutek polaryzacji detektora odpowiednim napięciem ujemne elektrony i dodatnie dziury rozchodzą się do przeciwnych biegunów detektora. Powstały impuls elektryczny jest odpowiednio wzmacniany i podany na wejście analizatora wielokanałowego. Analizator przelicza amplitudę impulsu na numer komórki w swojej pamięci zwany kanałem i zapamiętuje w poszczególnych kanałach, ile było cząstek

o różnych amplitudach. Rejestrowana jest zatem zarówno liczba cząstek padających na powierzchnię detektora, jak i ich energia. Widmo energetyczne promieniowania β docierającego do detektora można obejrzeć na ekranie komputera i poddać analizie numerycznej.

5. Hipoteza

Źródłem cząstek β w wykonywanym ćwiczeniu jest izotop promieniotwórczy o znanej maksymalnej energii kinetycznej cząstek. Na podstawie zmierzonego widma promieniowania będzie można wyznaczyć energię kinetyczną cząstek, których jest najwięcej. Po ustawieniu pola magnetycznego na drodze cząstek ze źródła będzie można sprawdzić, w którą stronę odchylają się i dla jakiego kąta α jest ich najwięcej. Powinny to być właśnie cząstki o wyznaczonej energii kinetycznej E_k , a znając ten kąt α , indukcję pola magnetycznego B i długość obszaru jego działania d będzie można obliczyć wartość ich ładunku elektrycznego. Znając kierunek odchylenia będzie można także określić znak ładunku i przekonać się, czy cząstki emitowane ze źródła to cząstki β^+ , β^- , czy też jeszcze inne.

4. Przebieg doświadczenia

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

- A) Włączyć układ pomiarowy zgodnie z dołączonym do niego opisem.
- B) Włączyć komputer, a w nim program do obsługi analizatora wielokanałowego.
- C) Przy pomocy układu do sterowania stolikiem ustawić magnes w pozycji oddalonej od źródła, a detektor naprzeciw kolimatora (odpowiada to zerowemu kątowi odchylenia).
- D) Uruchomić nowy pomiar widma promieniowania β . Czas trwania pomiaru ustalić z obsługą laboratorium.
- E) Po zakończeniu pomiaru przy pomocy funkcji dostępnych w programie odczytać z widma numer kanału k_{max} odpowiadający energii maksymalnej cząstek oraz numer kanału k odpowiadający największemu natężeniu promieniowania.
- F) Odczytać z danych tablicowych maksymalną energię kinetyczną cząstek emitowanych z danego źródła promieniotwórczego E_{max} , która odpowiada numerowi kanału k_{max} i z proporcji obliczyć energię E_k odpowiadającą numerowi kanału k .
- G) Przy pomocy układu do sterowania stolikiem ustawić magnes naprzeciw kolimatora, a ramię detektora pod wybranym kątem α .
- H) Uruchomić nowy pomiar widma promieniowania β . Czas trwania pomiaru ustalić z obsługą laboratorium.
- I) Po zakończeniu pomiaru odczytać średnią liczbę impulsów na sekundę n , co jest miarą natężenia promieniowania odchylanego pod ustawionym kątem. Otrzymaną wartość n zapisać wraz z kątem α .
- J) Pomiary średniej liczby impulsów na sekundę n powtórzyć dla różnych wartości kąta α . Zakres kątów ustalić z obsługą laboratorium mając na uwadze, że celem jest odnalezienie wartości kąta, dla której natężenie promieniowania jest największe.
- K) W którą stronę odchylają się cząstki przelatując przez obszar działania pola magnetycznego: w prawo czy w lewo? Co to mówi o znaku ładunku elektrycznego tych cząstek?
- L) Znając energię kinetyczną cząstek E_k , których natężenie jest największe, oraz kąt α , pod jakimi są odchylane, obliczyć na podstawie wzorów (8) i (9) wartość ładunku cząstek q . Pozostałe potrzebne wartości odczytać z tablic lub opisu układu pomiarowego.

M) Czy obliczona wartość zgadza się z oczekiwaniami? Co by było, gdyby energia kinetyczna cząstek byłaby inna z powodu omyłkowego użycia innego źródła? Co by było, gdyby cząstki miały inną masę spoczynkową niż założona?

N) Oszacować niepewności pomiarowe zmierzonych i obliczonych wielkości. Jak to oszacowanie wpływa na wnioski wyciągnięte z pomiaru?

O) Po zakończeniu ćwiczenia wyłączyć układ pomiarowy i komputer zgodnie z dołączonym opisem.