



ĆWICZENIE

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

15

## Oddziaływanie cząstek $\beta$ z polem magnetycznym

Data pomiaru: .....

Imię i nazwisko: .....

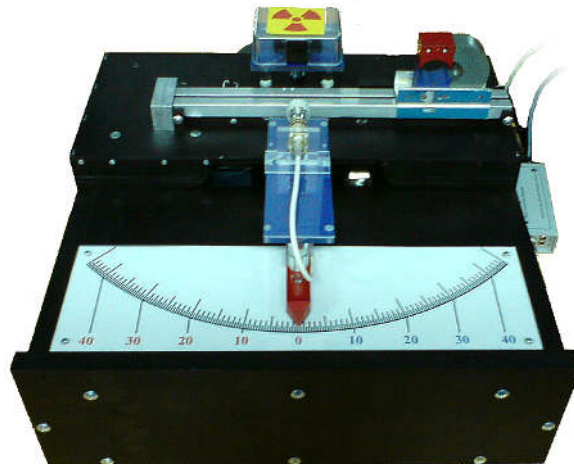
Imię i nazwisko: .....

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zbadanie zachowania cząstek beta emitowanych ze źródła  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  w polu magnetycznym (z uwzględnieniem efektów relatywistycznych).

### 2. UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Wygląd stolika ze źródłem promieniowania, ruchomym detektorem i magnesem, użytego w doświadczeniu przedstawiono na rysunku 1, a schemat całej aparatury – na rysunku 3. Dane aparatury zasilającej znajdują się w dalszej części opisu ćwiczenia. Dane o źródle promieniowania  $\beta$  umieszczono w ramce.

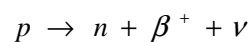
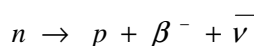


Rys. 1. Stolik z ruchomym ramieniem do badania odchylenia cząstek  $\beta$  w polu magnetycznym

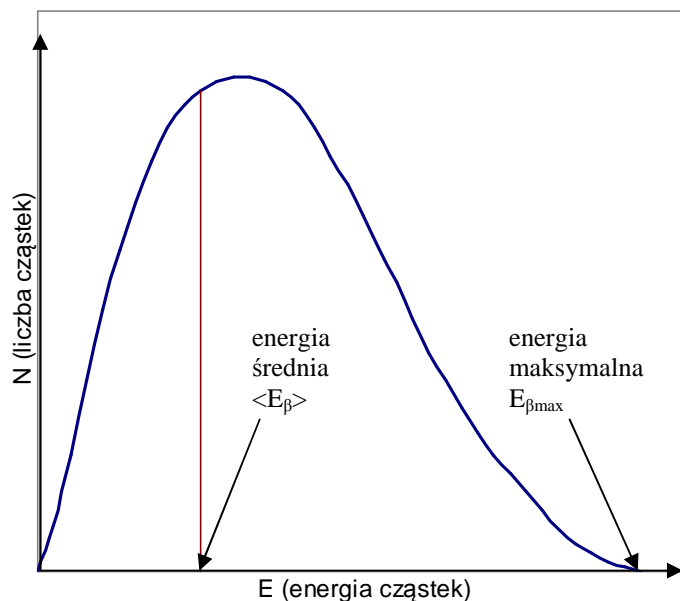
### 3. WSTĘP TEORETYCZNY

#### 1. Powstawanie promieniowania $\beta$

Cząstki  $\beta$  to elektrony, które powstają wskutek reakcji jądrowych zwanych rozpadami  $\beta$ . W jądrach atomowych następują wtedy przemiany struktury. Rozpad  $\beta^-$  to taki, w którym neutron rozpada się na proton, elektron i antyneutrino elektronowe. Rozpad  $\beta^+$  odpowiada sytuacji, gdy proton rozpada się na neutron, pozyton i neutrino elektronowe.



Ponieważ rozpad  $\beta$  jest rozpadem trójciałowym, energia wydzielona w jego wyniku zostaje nierówno rozdzielona na wszystkie trzy ciała. Ener-



Rys. 2. Typowe widmo promieniowania  $\beta$



Rys. 3. Schemat aparatury użytej w doświadczeniu

gia cząstek  $\beta$  może zatem wynosić od zera aż do maksymalnej energii dostępnej w rozpadzie. Rysunek 2 pokazuje typowy kształt widma energetycznego rozpadu  $\beta$ . Chcąc scharakteryzować energię widma podaje się energię maksymalną albo energię średnią (równą około 1/3 wartości energii maksymalnej). W wypadku elektronów przyspieszanych w akceleratorze możemy uzyskiwać elektrony o jednej, zadanej wartości energii, zwanych monoenergetycznymi. Ich widmo ma kształt pojedynczego wąskiego piku (wierzchołka).

## 2. Zachowanie promieniowania $\beta$ w polu magnetycznym

Mówiąc o promieniowaniu  $\beta$  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:

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

gdzie  $q$  to ładunek cząstki,  $v$  to jej prędkość,  $B$  to indukcja zewnętrznego pola magnetycznego, zaś symbol  $\times$  oznacza iloczyn wektorowy.

Wartość siły Lorentza można zatem wyrazić wzorem skalarnym:

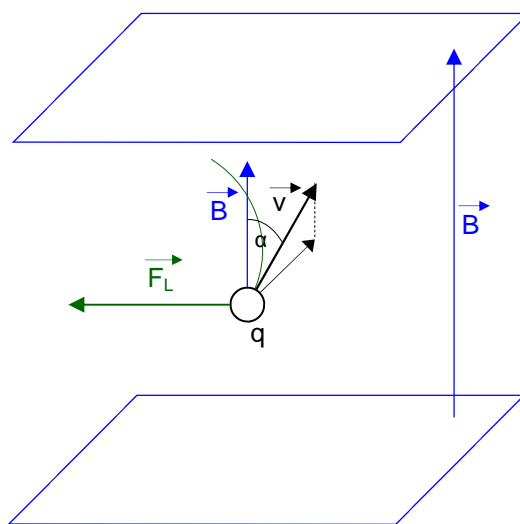
$$(2) \quad F_L = qvB \sin \alpha$$

gdzie  $\alpha$  to kąt pomiędzy wektorami prędkości i indukcji pola magnetycznego. Gdy cząstki  $\beta$  poruszają się dokładnie prostopadłe do wektora indukcji magnetycznej, siła Lorentza osiąga wartość maksymalną. W takim przypadku tor cząstek ma kształt łuku okręgu, a siła Lorentza ma charakter siły dośrodkowej, którą można wyrazić wzorem:

$$(3) \quad F_d = mv^2/r$$

gdzie  $m$  to masa cząstki,  $v$  to jej prędkość, zaś  $r$  to promień okręgu, po którym porusza się cząstka.

Ze względu na to, że cząstki  $\beta$  emitowane przez źródła promieniotwórcze mogą osiągać energię rzędu MeV (milionów elektronowoltów) i prędkości zbliżone do prędkości światła w próżni, należy wziąć pod uwagę występujące efekty relatywistyczne. Można to zrobić przyjmując, że masa cząstki  $m$  w powyższym wzorze jest masą relatywistyczną:



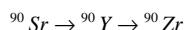
Rys. 4. Działanie siły Lorentza na cząstkę naładowaną elektrycznie



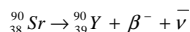
## DANE O ŹRÓDLE PROMIENIOTWÓRCZYM



Rozpad promieniotwórczy  $\beta^-$  polega na emisji z jądra atomowego danego izotopu elektronu  $\beta^-$  oraz antyneutrino  $\bar{\nu}$ . Źródłem promieniowania  $\beta^-$  jest w naszym ćwiczeniu sukcesywny rozpad izotopów strontu i itru:

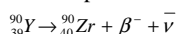


Dla rozpadu:



$T_{1/2} = 28,64$  lat. Wynikiem spełnienia prawa zachowania energii i prawa zachowania pędu dla trzech ciał – w tym przypadku są to: jądro atomowe  ${}^{90}\text{Y}$ , elektron  $\beta^-$  i antyneutrino  $\bar{\nu}$  – jest **ciągłe** widmo energetyczne elektronów, kończące się na energii  $E_{\beta\text{max}} = 0,546$  MeV, wynikającej z różnicy mas jądra wyjściowego  ${}^{90}\text{Sr}$  i jądra końcowego  ${}^{90}\text{Y}$ . Dla rozpadu  ${}^{90}\text{Sr}$   $E_{\beta} \leq 0,546$  MeV, a energia średnia  $\langle E_{\beta} \rangle = 0,196$  MeV.

Jądro  ${}^{90}\text{Y}$  jest również promieniotwórcze:



Dla tego rozpadu  $T_{1/2} = 64,1$  godz.,  $E_{\beta} \leq 2,282$  MeV, a energia średnia  $\langle E_{\beta} \rangle = 0,934$  MeV.

Widmo ciągłe promieniowania  $\beta^-$  z rozpadu  ${}^{90}\text{Sr}$

Energia elektronów beta [keV]	%
0 – 10	2,88
10 – 20	2,84
20 – 40	5,6
40 – 100	16,5
100 – 300	49,2
300 – 546	23,0

Widmo ciągłe promieniowania  $\beta^-$  z rozpadu  ${}^{90}\text{Y}$

Energia elektronów beta [keV]	%
0 – 10	0,337
10 – 20	0,344
20 – 40	0,71
40 – 100	2,29
100 – 300	9,4
300 – 600	17,5
600 – 1300	42,5
1300 – 2282	26,9

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (4)$$

gdzie  $m_0$  to masa spoczynkowa cząstki, a  $c$  to prędkość światła w próżni.

Porównując wzory na maksymalną siłę Lorentza i siłę dośrodkową uzyskujemy:

$$qvB = \frac{m_0 v^2}{r \sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (5)$$

skąd po przekształceniach możemy znaleźć wzór na prędkość cząstki poruszającej się po okręgu o promieniu  $r$  w znanym polu magnetycznym  $B$ :

$$v = qBr / \sqrt{m_0^2 + (qBr/c)^2} \quad (6)$$

Znając prędkość cząstki można obliczyć jej energię kinetyczną, która w ujęciu relatywistycznym jest różnicą pomiędzy energią całkowitą ( $mc^2$ ) a spoczynkową ( $m_0c^2$ ) cząstki i wyraża się wzorem:

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) \quad (7)$$

Przekształcając to równanie można znaleźć także relację odwrotną, czyli wyznaczyć prędkość cząstki poruszającej się z energią kinetyczną  $E_k$ :

$$v = c \sqrt{1 - \left( \frac{m_0c^2}{E_k + m_0c^2} \right)^2} \quad (8)$$

Można też wyznaczyć zależność promienia  $r$  od energii kinetycznej  $E_k$  uwzględniając pęd cząstki  $p = mv$ . Porównując wzory (2) i (3) otrzymujemy zależność:

$$\begin{aligned} F_L &= qvB = mv^2/r = F_d \\ qB &= mv/r = p/r \\ r &= p/qB = pc/qBc \end{aligned}$$

Znając zależność relatywistyczną pędu  $p$  od energii całkowitej  $E$  i spoczynkowej  $m_0c^2$ :

$$E^2 = (m_0c^2)^2 + (pc)^2 \quad (9)$$

i wiedząc równocześnie, że:

$$E = E_k + m_0c^2$$

możemy wyznaczyć wzór na wielkość  $pc$ :

$$\begin{aligned} (m_0c^2)^2 + (pc)^2 &= (E_k + m_0c^2)^2 \\ (m_0c^2)^2 + (pc)^2 &= E_k^2 + 2E_k m_0c^2 + (m_0c^2)^2 \\ pc &= \sqrt{E_k^2 + 2E_k m_0c^2} \end{aligned}$$

który podstawimy do wzoru na promień  $r$  otrzymując:

$$r = \frac{\sqrt{E_k^2 + 2E_k m_0c^2}}{qBc} \quad (10)$$

### 3. Odchylenie cząstek $\beta$ w układzie pomiarowym.

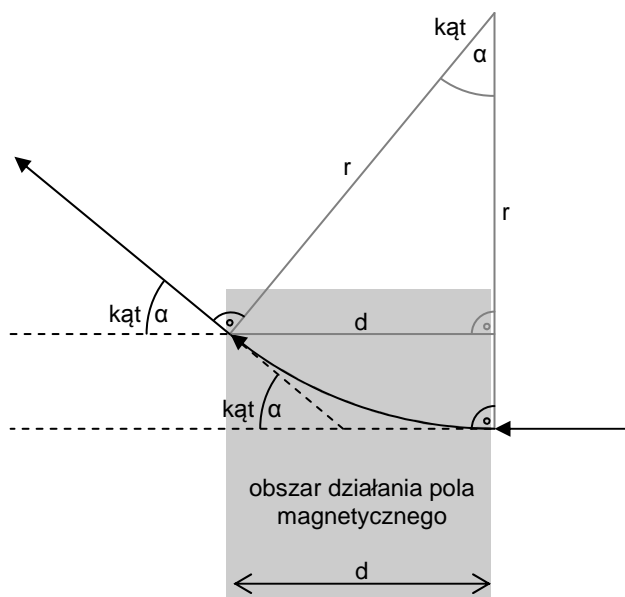
Skolimowana wiązka promieniowania  $\beta$  natrafiając na pole magnetyczne ulega odchyleniu o pewien kąt, którego zależność od promienia łuku skreślenia można wyznaczyć znając geometrię układu użytego w ćwiczeniu. Ilustruje to rysunek 5.

Cząstki wpadające w pole magnetyczne z prawej strony na rysunku lecą najpierw po linii prostej, po czym skręcają po łuku okręgu w obszarze działania pola magnetycznego o indukcji  $B = 0,038$  T. Obszar ten ma grubość  $d = 25$  mm. (Niepewność pomiaru obu tych wielkości można oszacować na 10% ze względu na rozmiary i możliwą niejednorodność pola.) Wylatując z obszaru działania pola magnetycznego cząstka znowu zaczyna poruszać się po linii prostej, ale leci w innym kierunku. Kąt  $\alpha$  pomiędzy kierunkiem pierwotnym a odchylonym zależy od długości i promienia łuku, jaki zakreśla cząstka w obszarze działania pola. Jak widać z rysunku, ze względu na podobieństwo trójkątów, zależność tą można opisać prostym trygonometrycznym wzorem:

$$d = r \cdot \sin \alpha \quad (11)$$

Ponieważ w ćwiczeniu można zmierzyć kąt odchylenia toru cząstek, a odległość  $d$  jest dana, możemy zatem wyznaczyć promień  $r$ .

W rzeczywistości zachowanie się cząstek  $\beta$  jest dużo bardziej skomplikowane, co może wpływać



Rys. 5. Odchylenie toru cząstek  $\beta$  w układzie pomiarowym (widok z góry).

na uzyskane wyniki. Na kształt toru cząstek mogą mieć wpływ takie warunki jak:

- niejednorodność pola magnetycznego,
- ograniczona skuteczność kolimatora,
- rozpraszanie cząstek na elementach układu i w powietrzu,
- ziemskie pole magnetyczne itp.

W praktyce wpływ ten jest często pomijalnie mały, np. wartość indukcji ziemskiego pola magnetycznego wynosi ok.  $20 \mu\text{T}$ , co stanowi mniej niż 0,1% wartości pola używanego w doświadczeniu. Należy jednak zachować świadomość występowania tych czynników i sprawdzać, czy faktycznie można je pominąć.

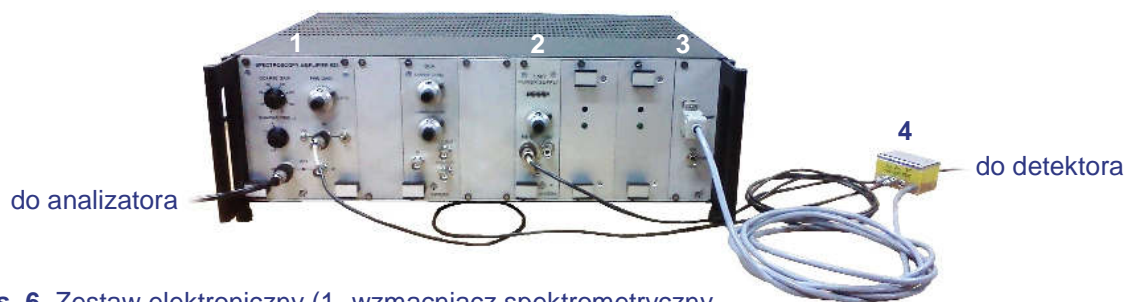
Pomiar kąta może być obarczony dodatkowym błędem ze względu na niedoskonałość aparatury. Ramię, na którym obraca się detektor, umieszczone jest na osi pokrywającej się ze środkiem pola magnetycznego wytworzonego przez magnes stały. Jak można łatwo zauważyć, nie zawsze przedłużenie toru odchylonych cząstek przechodzi przez tę oś, jednak w praktyce różnice występujące dla zakresu kątów przyjętego w ćwiczeniu są minimalne i nie wpływają znacząco na wynik.

#### **4. Detekcja promieniowania $\beta$**

Do detekcji promieniowania  $\beta$  w ćwiczeniu służy detektor półprzewodnikowy, w którym w wyniku depozycji energii padającej cząstki powstaje ładunek elektryczny proporcjonalny do tej energii.

Powstały impuls elektryczny wzmacniany jest przez przedwzmacniacz ładunkowy, a następnie przez liniowy wzmacniacz impulsowy. Wzmocniony impuls podany na wejście analizatora wielokanałowego jest rejestrowany w jego pamięci, skąd dane o impulsach zebranych w różnych kanałach można odczytać przy użyciu komputera. Numer kanału odpowiada wielkości impulsu.

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



**Rys. 6.** Zestaw elektroniczny (1- wzmacniacz spektrometryczny, 2 - zasilacz napięcia polaryzacji detektora, 3 - zasilacz przedwzmacniacza, 4 - przedwzmacniacz)

#### 4. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

**A)** Przed włączeniem zasilania sprawdzić i ewentualnie skorygować połączenia kablowe oraz ustawienie elementów regulacyjnych w aparaturze elektronicznej (rys. 6):

- w zasilaczu polaryzacji detektora:
  - okienko „0”,
  - precyzer „00”,
 co zeruje napięcie polaryzacji;
- we wzmacniaczu spektrometrycznym impulsów:
  - wzmacnienie „FINE GAIN”: <sup>1</sup>,
  - wzmacnienie „COARSE GAIN”:  μs.

**B)** Przed przystąpieniem do pomiarów należy:

- włączyć zasilanie zestawu elektronicznego przełącznikiem „POWER” po prawej stronie,
- włączyć zasilanie stolika przełącznikiem w pobliżu przewodu zasilającego (powinny zaświecić się diody sygnalizujące obecność napięcia),
- włączyć komputer i po zalogowaniu się uruchomić program „Tukan8k” z pulpitu.

**C)** Po włączeniu zasilania przestawić przełącznik na zasilaczu napięcia polaryzacji z pozycji „OFF” na pozycję „ON”, po czym powoli zwiększać napięcie polaryzacji aż do osiągnięcia na wyświetlaczu wartości , co odpowiada napięciu polaryzacji ok.  V. Obracając potencjometr nie należy obracać nim szybciej niż 1 obrót na 2 sekundy.

**D)** Przygotować stolik do pracy ustawiając detektor w pozycji zerowej, tj. na wprost od źródła promieniowania (kąt odchylenia ramienia równy 0 stopni), a magnes w pozycji krańcowej z dala od kolimatora.

**E)** W programie „Tukan8k”, będącym programem obsługi analizatora impulsów na złączu USB, w menu „Pomiar”→„Kryteria stopu...” nastawić czas rzeczywisty pomiaru na  s i zaznaczyć to kryterium jako aktywne. Zatwierdzić ustawienia i w oknie głównym programu uruchomić pomiar.

**F)** Porównać otrzymany wykres widma promieniowania z teoretycznym widmem promieniowania  $\beta$ . Przedyskutować różnice pod kątem możliwego pochodzenia. W programie „Tukan8k” ograniczyć cały wykres od dołu i od góry dwoma przesuwanymi znacznikami („markerami”). Z dolnej części okna odczytać jego całkowite pole. Jest to liczba impulsów zarejestrowanych przez analizator, którą należy zanotować w tabeli 1. Zapisać widmo pomiaru do pliku we wskazanym przez prowadzącego katalogu.

**G)** Ustawić magnes na wprost od źródła promieniowania, na osi wiązki z kolimatora. W tym celu na panelu sterowania stolika przestawić przełącznik pozycji magnesu na „pozycja robocza”, kierunek ruchu magnesu na „w lewo”, po czym wcisnąć i przytrzymać przycisk „start” przez ok. 10 s. Po puszczaniu przycisku poczekać, aż magnes zatrzyma się w pozycji roboczej.

<sup>1</sup> szczegółowe ustawienia aparatury podane zostaną w trakcie wykonywania ćwiczenia

- H)** Nastawić czas rzeczywisty pomiaru w programie „Tukan8k” na  $\square$  s i uruchomić pomiar. Po jego zakończeniu przedyskutować zaobserwowane zmiany w otrzymanym widmie oraz w całkowitej liczbie impulsów.
- I)** Korzystając z przycisków na prawej części panelu sterującego stolika ustawić detektor pod pewnym kątem względem osi kolimatora. UWAGA: dozwolone są zarówno dodatnie wartości kąta (detektor po prawej stronie od osi), jak i ujemne (detektor po lewej stronie od osi).
- J)** Po ustawieniu detektora przeprowadzić pomiar dla danego kąta i zapisać całkowitą liczbę impulsów w tabeli 2. Takie pomiaru przeprowadzić dla co najmniej kilkunastu różnych kątów ze szczególnym uwzględnieniem okolic maksymalnej liczby impulsów.
- K)** Znajdź kierunek, w którym odchylają się cząstki emitowane ze źródła użytego w ćwiczeniu oraz kierunek i zwrot linii sił pola magnetycznego (magnes stały ma oznaczone bieguny N i S) ustalić znak ładunku cząstek. Można do tego celu wykorzystać reguły stosowane z fizyce (np. „reguła prawej dłoni”, „reguła lewej dłoni” itp.)
- L)** Wykonać wykres częstości zliczeń w zależności od kąta odchylenia. Znaleźć maksimum i określić kąt, dla którego występuje. Przedyskutować podobieństwa i różnice pomiędzy otrzymanym wykresem a widmem promieniowania odczytanym wcześniej na komputerze bez obecności pola magnetycznego.
- M)** Korzystając z równania (11) znaleźć promień  $r$  krzywizny toru cząstek dla wyznaczonego kąta.
- N)** Na wykresie widma promieniowania bez pola magnetycznego również znaleźć maksimum i określić energię kinetyczną cząstek  $E_k$ , a następnie obliczyć ich prędkość  $v$  z równania (8). Jak różniłaby się wartość prędkości obliczona przy pomocy wzoru z mechaniki klasycznej?
- ★ **O)** Znajdź wartości  $r$  i  $v$  oraz  $B$  obliczyć ładunek cząstek  $q$  z równania (5). Za  $m_0$  przyjmij masę spoczynkową elektronu  $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg, a  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. Porównaj wartość  $q$  z wartością ładunku elementarnego  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C.
- ★ **P)** Podstawiając do wzoru (10) wartość ładunku elementarnego  $q = e$  wyznacz ponownie promień krzywizny toru  $r$  i porównaj go z wartością zmierzoną wcześniej.
- ★ **R)** Przeprowadzić rachunek błędów dla wyznaczonych wartości  $r$ ,  $v$  i  $q$ . Można wykorzystać do tego celu metodę różniczeki zupełnej.
- S)** Po wykonaniu ćwiczenia wyłączyć aparaturę w następujący sposób:
- ustawić magnes tak, by zasłaniał sobą oś kolimatora, tj. w lewej pozycji krańcowej. Dokonuje się tego przestawiając przełącznik pozycji magnesu na „krańcowa”, przełącznik kierunku ruchu magnesu na „w lewo”, przytrzymując przez kilkanaście sekund przycisk „start” po lewej stronie panelu i czekając, aż magnes zasłoni kolimator;
  - w zasilaczu polaryzacji ustawić:
    - okienko „0”,
    - precyzer „00”,
 co wyzeruje napięcie polaryzacji;
  - przestawić przełącznik na zasilaczu polaryzacji z pozycji „ON” na pozycję „OFF”
  - wyłączyć zasilanie zestawu elektronicznego przełącznikiem z napisem „POWER” po prawej;
  - wyłączyć program „Tukan8k”, a następnie wylogować się i wyłączyć komputer.

---

★ podana jest pełna wersja ćwiczenia; w konkretnych przypadkach zakres zadań może być mniejszy



ĆWICZENIE <b>15</b>	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ Oddziaływanie cząstek $\beta$ z polem magnetycznym
Data pomiaru:.....	
Imię i nazwisko studenta/ucznia:.....	
Imię i nazwisko studenta/ucznia:.....	
Szkoła, klasa:.....	

### Opracowanie wyników:

Maksimum intensywności promieniowania $\beta$ w widmie energetycznym dla energii	$E_k$ [MeV]	
Maksimum intensywności promieniowania $\beta$ dla kąta ugięcia wiązki	$\alpha$ [°]	
Promień krzywizny toru cząstki $\beta$ dla powyższego kąta	$r$ [mm]	
Wyznaczony znak ładunku cząstek $\beta$	[+/-]	
Obliczona wartość ładunku cząstek $\beta$	$q$ [C]	

Dodatkowe dane:

$$B = 0,038 \pm 0,004 \text{ T}$$

$$d = 25 \pm 3 \text{ mm}$$

$$m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_0 c^2 = 8,187 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 0,511 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 1 \text{ V} \cdot \text{A} = 1 \text{ V} \cdot \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ T} = 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$$



