



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	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ
7	Pomiar maksymalnej energii promieniowania β
Data pomiaru:	
Imię i nazwisko:	
Imię i nazwisko:	

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zbadanie pochłaniania cząstek beta emitowanych ze źródła $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ w zależności od rodzaju absorbentu i na tej podstawie wyznaczenie ich maksymalnej energii.

2. UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Rysunek 1 przedstawia domek osłonowy używany w ćwiczeniu wraz z sondą i zestawem pochłaniaczy, zaś schemat całej aparatury użytej w doświadczeniu przedstawiono na rysunku 3. Dane o źródle promieniowania β umieszczono w ramce.

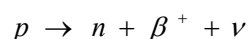
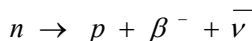


Rys. 1

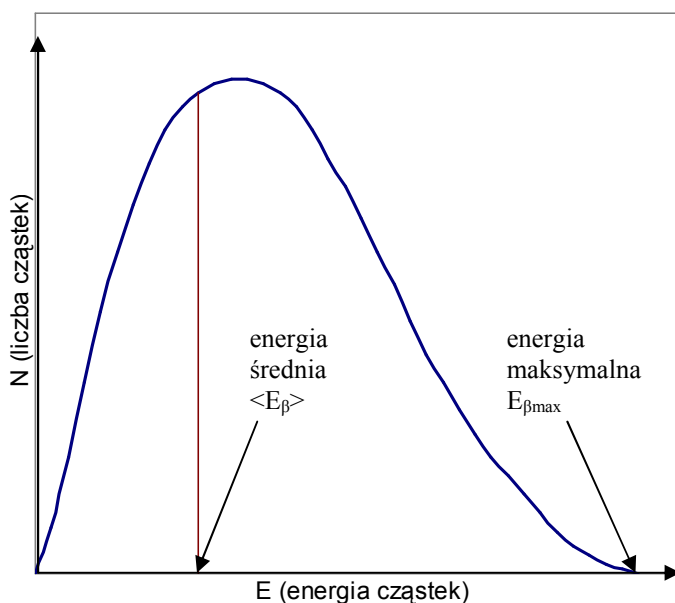
3. WSTĘP TEORETYCZNY

1. Powstawanie promieniowania β

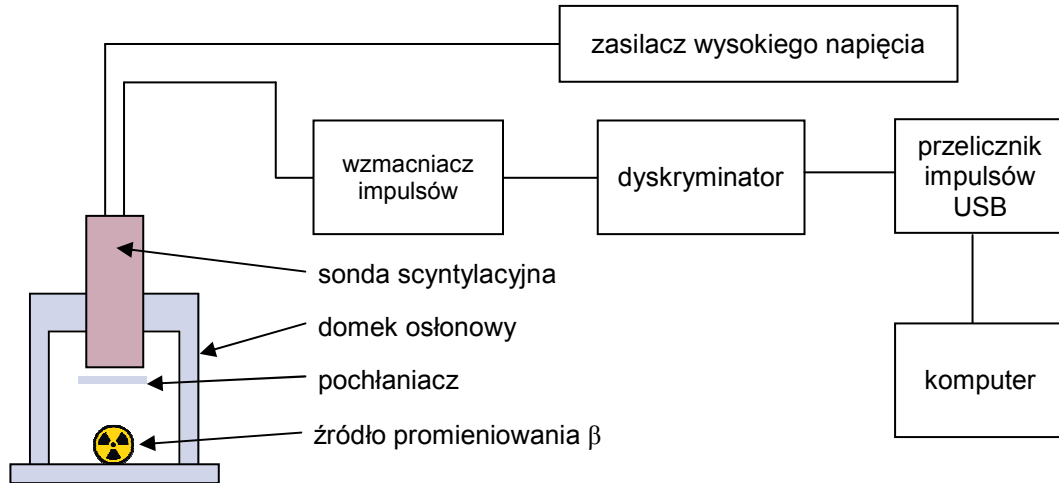
Cząstki β powstają wskutek reakcji jądrowych zwanych rozpadami β , podczas których w jądrach atomowych następują przemiany struktury. Rozpad β^- to taki, w którym neutron rozpada się na proton, elektron i antyneutrino elektronowe. Rozpad β^+ odpowiada sytuacji, gdy proton rozpada się na neutron, pozyton i neutrino elektronowe.



Ponieważ rozpad β jest rozpadem trzyciałowym, energia wydzielona w jego wyniku zostaje nierówno rozdzielona na wszystkie trzy ciała. Energia cząstek β może zatem wynosić od zera aż do maksymalnej energii dostępnej w rozpadzie. Rysunek 2 pokazuje typowe widmo rozpadu β , którego kształt jest zwykle taki sam. Chcąc scharakteryzować energię widma podaje się energię maksymalną albo energię średnią (równą około 1/3 wartości energii maksymalnej). W wypadku elektro-



Rys. 2. Widmo promieniowania β



Rys. 3. Schemat aparatury pomiarowej

nów przyspieszanych w akceleratorze możemy uzyskiwać elektrony o jednej, zadanej wartości energii, zwanych monoenergetycznymi. Ich widmo ma kształt pojedynczego wąskiego piksu.

2. Oddziaływanie promieniowania β z materią

Mówiąc o promieniowaniu β myślimy o strumieniach elektronów lub pozytonów. Głównym procesem usuwającym z wiązki pozytony jest ich anihilacja. Elektrony, przechodząc przez materię, tracą swoją energię głównie w wyniku jednego z trzech zjawisk: zderzeń sprężystych, zderzeń niesprężystych i promieniowania hamowania.

a) zderzenia sprężyste

W zderzeniu sprężystym z atomami ośrodka zachowywana jest energia kinetyczna cząstki. Zmianie ulega tor, przy czym im mniejsza jest energia elektronu, tym średnie odchylenie, doznane w wyniku rozproszeń, jest większe. Na skutek częstych zderzeń tor elektronu jest linią łamaną o długości kilka razy większej niż grubość warstwy, przez którą przechodzi.

b) zderzenia niesprężyste

W zderzeniach elektronów (cząstki β^-) z elektronami orbitalnymi atomów cząstki β^- mogą przekazać część swojej energii na jonizację lub wzbudzenie tych atomów. Strata energii na jonizację, odniesiona do jednostki drogi, jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalna do kwadratu prędkości cząstki:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_j \propto \frac{NZ}{v^2} = \rho \cdot N_{Av} \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{v^2} \quad (1)$$

gdzie: A – średnia masa atomowa absorbentu, Z – średnia liczba atomowa absorbentu, N_{Av} – liczba Avogadro, ρ – gęstość absorbentu, N – liczba atomów w cm^3 , v – prędkość cząstki.

Tę samą stratę energii można również wyrazić w postaci:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_j = wI_w \quad (2)$$

gdzie: w – ilość energii potrzebna do utworzenia jednej pary jonów (dla powietrza to około 32,5 eV), I_w – jonizacja właściwa (ilość par jonów powstałych na jednostkę drogi), której wielkość dla danego ośrodka zależna jest od energii padającego promieniowania β .

c) promieniowanie hamowania

Jest to zjawisko, którego wpływ jest istotny głównie dla elektronów o wysokiej energii. Polega ono na hamującym oddziaływaniu sił elektrostatycznych na elektron przechodzący w pobliżu jądra atomu. Energia, jaką traci elektron, emitowana jest w postaci promieniowania rentgenowskiego o ciągłym widmie. Wielkość tej straty na jednostkę drogi określa wzór:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_h \propto Z^2 NE \quad (3)$$

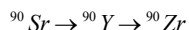
gdzie E oznacza energię elektronów, a Z i N średnią liczbę atomową absorbentu i liczbę jego atomów przypadającą na 1 cm^3 .



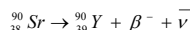
DANE O ŹRÓDLE PROMIENIOTWÓRCZYM



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

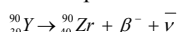


Dla rozpadu:



$T_{1/2} = 28,64$ lat. Wynikiem spełnienia prawa zachowania energii i prawa zachowania pędu dla trzech ciał – w tym przypadku są to: jądro atomowe ^{90}Y , elektron β^- 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}Sr i jądra końcowego ^{90}Y . Dla rozpadu ^{90}Sr $E_{\beta} \leq 0,546$ MeV, a energia średnia $\langle E_{\beta} \rangle = 0,196$ MeV.

Jądro ^{90}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 β^- z rozpadu ^{90}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 β^- z rozpadu ^{90}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

3. Prawo pochłaniania i zasięg cząstek β

Dla cząstek o tej samej energii kinetycznej przenikliwość cząstek β jest znacznie większa niż cząstek α , ale równocześnie dużo mniejsza niż promieniowania γ . Przykładowo: zasięg w powietrzu cząstek β o energii 3 MeV wynosi około 1150 cm, natomiast dla cząstek α , o tej samej energii kinetycznej tylko 2 cm. Z uwagi na wielkość zasięgu, najczęściej stosowanym absorbentem przy pomiarach promieniowania β jest aluminium. Przebieg typowej krzywej pochłaniania promieniowania β (w przypadku prostego widma) podany jest na rysunku 4.

Z rysunku tego widoczne jest, że logarytm szybkości zliczeń jest prawie liniową funkcją grubości absorbentu. W związku z tym można stosować przybliżone prawo pochłaniania w postaci:

$$(4) \quad I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

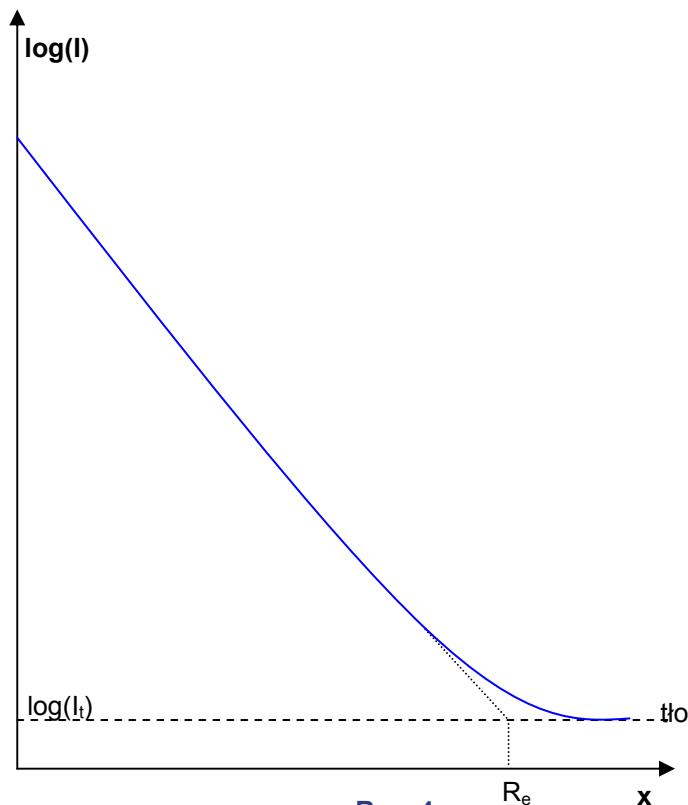
gdzie μ – liniowy współczynnik absorpcji [cm^{-1}]. W przypadku zastosowania pojęcia tzw. masowego współczynnika absorpcji ($\mu_m = \mu/\rho$) wzór (4) przyjmie postać:

$$(5) \quad I(x) = I_0 e^{-\mu_m x_m}$$

gdzie $x_m = \rho \cdot x$ jest gęstością powierzchniową atomów (masą atomów w jednostce powierzchni materiału, np. w g/cm^2).

W bardziej skomplikowanych rzeczywistych przypadkach wykres może składać się z kilku prostych, ponieważ promieniowanie może pochodzić z różnych izotopów zawartych w źródle. Na przykład w użytym w ćwiczeniu źródle znajdują się izotopy strontu i itru emitujące cząstki β o różnych energiach maksymalnych.

Z uwagi na wyraźne odchylenie krzy-



Rys. 4

wej absorpcji od prawa wykładniczego w końcowej jej części, nie można wyznaczyć dokładnej wartości zasięgu cząstek β . Z tego względu wprowadza się pojęcie *zasięgu efektywnego* (R_e). Wielkość tego zasięgu (liczona w g/cm^2) jest w przybliżeniu niezależna od rodzaju absorbentu, a zależy jedynie od energii padającego promieniowania β .

Przy pomiarach osłabienia promieniowania β wprowadza się również pojęcie *warstwy połówkowej* ($d_{1/2}$), tzn. grubości absorbentu, po przejściu przez którą natężenie promieniowania ulega dwukrotnemu osłabieniu. Dla części wykresu na rys. 4 możemy przybliżyć go za pomocą prostej, a na niej wyznaczyć punkty, pomiędzy którymi natężenie promieniowania spada dwukrotnie. Różnica wartości x dla tych punktów jest co do wartości równa grubości warstwy połówkowej.

Znając grubość warstwy połówkowej z wykresu na rys. 6 można odczytać wartość maksymalnej energii promieniowania β . Zależność tę można również przybliżyć wzorem:

$$d_{1/2} = 0,038 E_{\beta \max}^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

gdzie energia $E_{\beta \max}$ jest wyrażona w MeV, a grubość warstwy połówkowej $d_{1/2}$ w g/cm^2 . Przekształcając powyższy wzór można obliczyć maksymalną energię cząstek β :

$$E_{\beta \max} = \left(\frac{d_{1/2}}{0,038} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

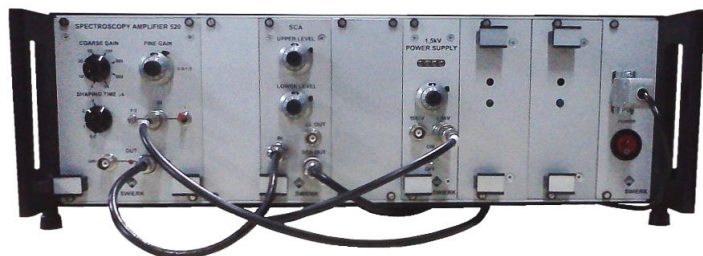
Zależność tę, wyznaczoną w sposób empiryczny, wykorzystuje się w ćwiczeniu.

4. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

UWAGA: wszelkie operacje ze źródłami promieniowania przeprowadza obsługa laboratorium!

A) Sprawdzić ustawienia aparatury na układzie zasilającym i wzmacniającym sygnał:

- w zasilaczu wysokiego napięcia:
 $U_L = 0 \text{ V}$,
włącznik w pozycji: „off”;
- we wzmacniaczu impulsów:
polaryzacja wejścia: „+”
wzmocnienie: ☐¹,
kształt impulsów (shaping): ☐ μs ;
- w dyskryminatorze:
 $U_{\text{LOWER LEVEL}} = \text{ } \text{V}$;
 $U_{\text{UPPER LEVEL}} = \text{ } \text{V}$.



Rys. 5. Układ zasilający i wzmacniający

B) Włączyć zasilanie układu przyciskiem po prawej stronie. Następnie przełączyć włącznik zasilacza wysokiego napięcia w pozycję „on” i kręcąc powoli (nie szybciej niż 1 obrót na sekundę) wieloobrotowym potencjometrem ustawić napięcie $U_L = \text{ } \text{V}$.

C) Włączyć komputer i po zalogowaniu się uruchomić program „hs_counter” z pulpitu, będący programem obsługi przelicznika impulsów na złączu USB.

D) W programie „counter” zaznaczyć opcje „ZEROWANIE PRZED STARTEM” i „CZAS ZLICZANIA”. Wcisnąć przycisk „ZMIEN”, wpisać czas pojedynczego pomiaru (☐ s) i zatwierdzić przyciskiem „OK”.

E) Wykonać pomiar liczby impulsów tła (tzn. bez źródła promieniotwórczego) naciskając przycisk „START” w programie „counter”. Po czasie nastawionym czasie pomiaru spisać jego wynik do tabeli 1. Pomiar powtórzyć kilkakrotnie i obliczyć tło średnie $\bar{N}_t$. Wyniki zapisać w tabeli 1.

¹ szczegółowe ustawienia aparatury podane zostaną w trakcie wykonywania ćwiczenia

 **F)** Otworzyć domek osłonowy. Na dnie położyć (centrycznie) źródło promieniowania β (np. ^{90}Sr) warstwą emitującą w kierunku detektora scyntylacyjnego i zamknąć domek osłonowy.

G) Wykonać cztery pomiary liczby impulsów i ich wyniki zapisać w pierwszym wierszu tabeli 2. W ostatniej kolumnie tabeli obliczyć średnią z tych pomiarów.

H) Po wykonaniu pomiarów bez absorbentu otworzyć domek osłonowy, wsunąć w prowadnice wewnątrz domku absorbent o danej masie powierzchniowej, zamknąć domek i wykonać cztery kolejne pomiary. Wyniki zapisać w odpowiednim wierszu. Pomiary przeprowadzić dla wszystkich podanych w tabeli wartości masy powierzchniowej.

 **I)** Po wykonaniu wszystkich pomiarów usunąć źródło promieniowania z wnętrza domku osłonowego.

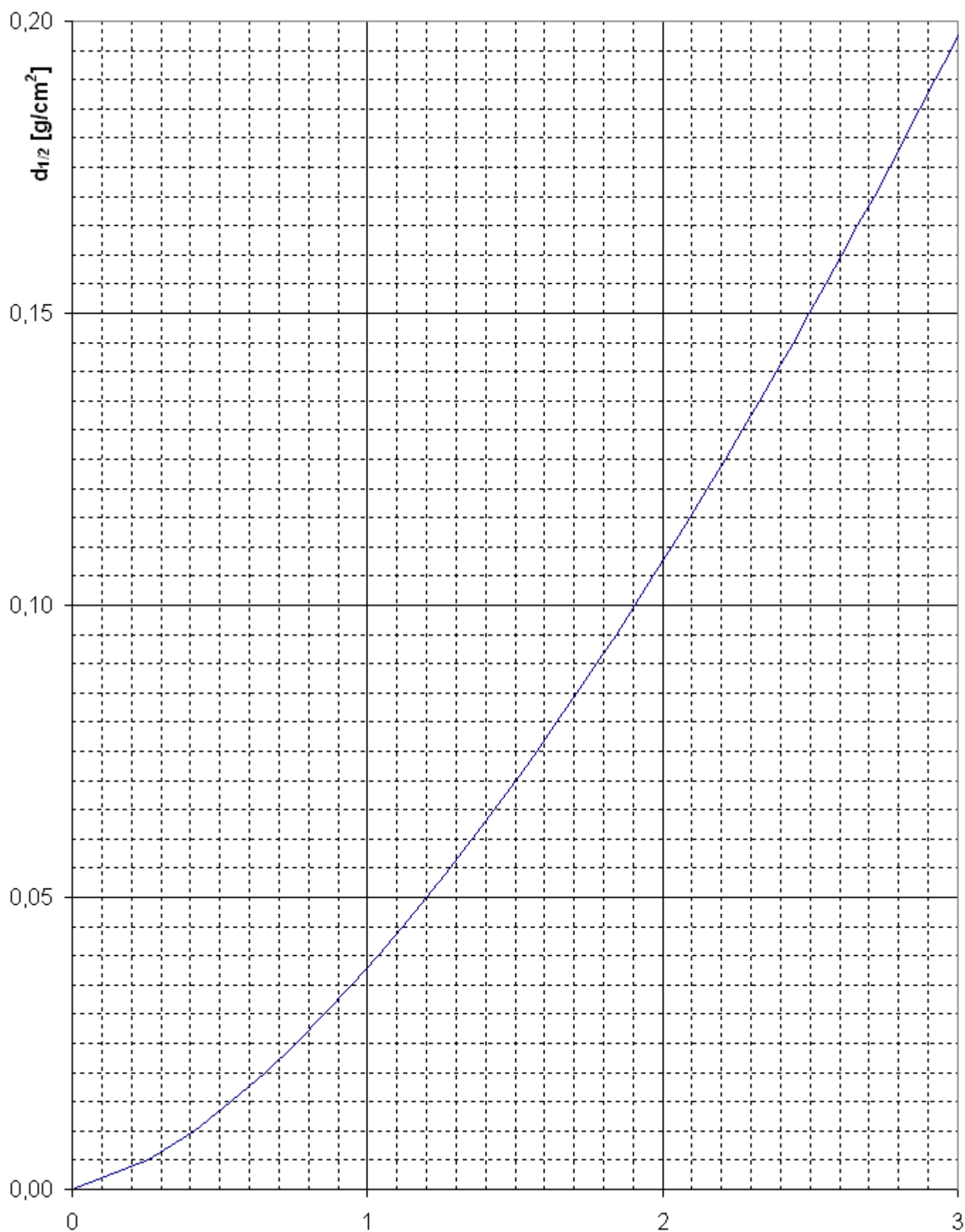
J) Wykonać wykres zależności liczby zmierzonych impulsów od masy powierzchniowej absorbentu $N = f(d)$ w skali logarytmiczno-liniowej. Czy zmierzone promieniowanie tła wpływa znacząco na wynik pomiaru? Jeśli tak, to uwzględnić jego wpływ przy wykonywaniu wykresu.

K) Do otrzymanego wykresu dopasować prostą. Na jej podstawie określić dla dowolnie wybranych odcinków wykresu tzw. masę połowicznego osłabienia, czyli masę powierzchniową, dla której ilość impulsów maleje dwukrotnie.

L) Korzystając z wykresu zależności $d_{1/2} = f(E_\beta)$ (rys. 6) określić maksymalną energię cząstek β emitowanych z badanego źródła promieniowania.

M) Wyjąć wszystkie pochłaniacze z domku osłonowego, włożyć je do pudełka oraz wyłączyć aparaturę. W tym celu:

- w zasilaczu wysokiego napięcia kręć powoli wieloobrotowym potencjometrem zredukować napięcie U_L do zera;
- wyłączyć wysokie napięcie przestawiając przełącznik zasilacza wysokiego napięcia w pozycję „off”;
- wyłączyć zasilanie całego bloku zasilająco-wzmacniającego przyciskiem po prawej stronie;
- zamknąć wszystkie otwarte programy, wylogować się i wyłączyć komputer.



Rys. 6 Zależność grubości warstwy połówkowej od energii maksymalnej promieniowania β $E_{\beta\text{max}}$ [MeV]

ĆWICZENIE 7	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ Pomiar maksymalnej energii promieniowania β
Data pomiaru:.....	
Imię i nazwisko:.....	
Wydział, kierunek, rok studiów:.....	
Szkoła, klasa:.....	

TABELA 1

i	N_i
1	
2	
3	
4	
5	
$\overline{N}_t =$	

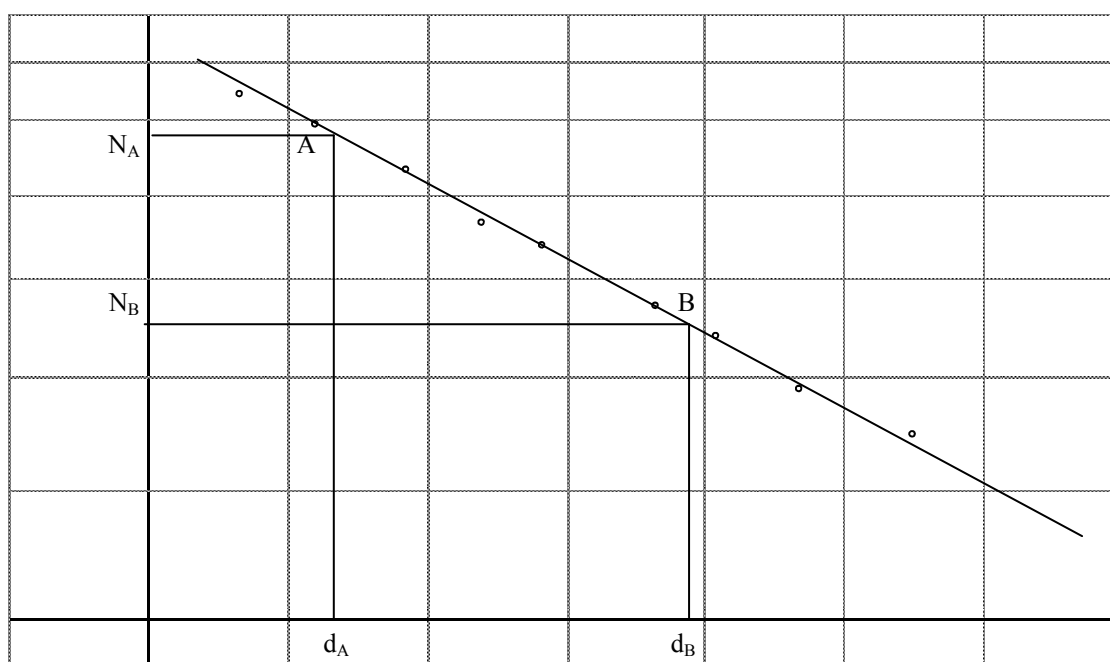
TABELA 2

Masa powierzchniowa [mg/cm ²]		N_1 [imp]	N_2 [imp]	N_3 [imp]	N_4 [imp]	$\overline{N}$ [imp]
0	0					
10,6	10,6					
30	30					
38	38					
59	59					
73	73					
91	91					
91 + 30	121					
91 + 59	150					
91 + 73	164					
185	185					
185 + 30	215					

TABELA 3

Zliczenia		Masa powierzchniowa	
N_A		d_A	
N_B		d_B	
$N_A : N_B$	2	$d_B - d_A$	

Opracowanie wyników:



Przykładowy wykres.

Po wykonaniu pomiarów należy na podstawie danych z tabeli 2 wykonać wykres taki jak powyższy, przeprowadzić prostą dopasowania, a na niej wybrać dwa punkty A i B. Odczytane wartości N_A , N_B , d_B i d_A wpisać do tabeli 3. Różnica wartości d_B i d_A jest poszukiwaną wartością $d_{1/2}$.

Znając $d_{1/2}$ należy korzystając z wykresu i wzoru zawartego w instrukcji do ćwiczenia określić maksymalną energię promieniowania. Wyniki wpisać poniżej.

Energia maksymalna widma β mierzonego źródła określona na podstawie:

- wykresu: MeV
- wzoru: MeV