



## Pomiar górnej granicy widma energetycznego promieniowania $\beta$ metodą absorpcji

### I. Zagadnienia

1. Teoria rozpadu  $\beta$ .
2. Oddziaływanie promieniowania  $\beta$  z materią.
3. Metody detekcji promieniowania  $\beta$ .
4. Sposób przeprowadzenia pomiaru i opracowania wyników.

### II. Wstęp teoretyczny

Promieniowaniem  $\beta$  nazywamy strumień elektronów (o ładunku + lub -) emitowanych przy rozpadzie promieniotwórczym. Ponieważ w akcie rozpadu  $\beta$  oprócz elektronów emitowane jest neutrino lub antyneutrino widmo promieniowania  $\beta$  jest ciągłe.

Energia maksymalna  $E_{\max}$  promieniowania  $\beta$  (zwana również górną granicą widma energetycznego) zawiera się w szerokich granicach od kilkunastu keV do kilku MeV. Ta maksymalna energia jest wielkością charakterystyczną dla danego radiopierwiastka co pozwala na jego identyfikację.

Wyznaczenie  $E_{\max}$  można przeprowadzić dwoma sposobami:

1. przez pomiar zasięgu maksymalnego cząstek  $\beta$ ;
2. przez pomiar grubości częściowego pochłaniania promieniowania (np. grubości osłabiającej natężenie wiązki do  $\frac{1}{2}$ ;  $\frac{1}{4}$ ; itd. pierwotnej wartości).

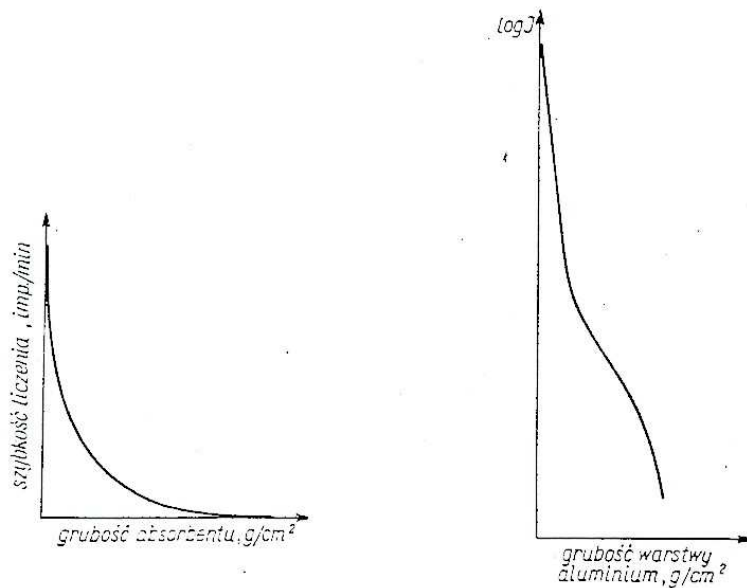
Promieniowanie  $\beta$  przy kolejnych aktach zderzenia zmienia swój kierunek i dlatego charakter osłabienia wiązki  $\beta$  w materii jest w dużym zakresie grubości absorbenta podobny do straty energii promieniowania elektromagnetycznego. Można go przedstawić zależnością:

$$I_R = I_0 \exp\left[\left(-\frac{\mu}{\rho}\right)R\right] \quad (2.1)$$

gdzie:

- $I_R$  – strumień cząstek  $\beta$  po przejściu warstwy absorbenta o grubości  $R$ ;
- $I_0$  – strumień cząstek  $\beta$  w nieobecności absorbenta;
- $R$  – grubość absorbenta w  $[\text{g}/\text{cm}^2]$ ;
- $\mu$  – liniowy współczynnik absorpcji  $[\text{cm}^{-1}]$ ;
- $\rho$  – grubość środowiska pochłaniającego w  $[\text{g}/\text{cm}^3]$ ;
- $\mu/\rho$  – masowy współczynnik pochłaniania w  $[\text{cm}^2/\text{g}]$ .

Na rys. 1 widzimy przykładowe krzywe absorpcji promieniowania  $\beta$ .



Rys. 1. Przykładowe krzywe absorpcji promieniowania  $\beta$  o widmie energetycznym złożonym

Natężenie  $I_R$  rejestrowane detektorem promieniowania nie zmniejsza się do zera nawet dla bardzo dużych wartości  $R$ , lecz osiąga wartość stałą, którą nazywamy natężeniem tła –  $I_t$ . Odcięta punktu, dla którego krzywa absorpcji styka się z tłem wyznacza tzw. maksymalny zasięg  $R_{max}$ , który odpowiada maksymalnej energii  $E_{max}$  promieniowania  $\beta$ . Dla elektronów  $\beta$  o energiach nie przekraczających kilku MeV, zasięg  $R_{max}$  zależy prawie liniowo od  $E_{max}$ .

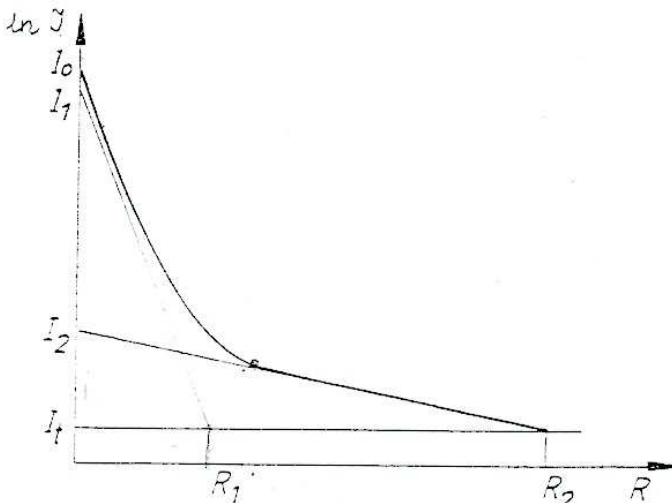
W przypadku jednej energii  $E_{max}$  wykresem funkcji  $f(R) = \ln I(R)$  jest linia prosta, zgodnie ze wzorem 2.1. Współczynnik absorpcji  $\mu$  zależy od energii maksymalnej.

W przypadku geometrii  $2\pi$ , wyraża to zależność:

$$\mu = 0,0155 E_{max}^{-1,41} \quad (2.2)$$

Ponieważ  $\mu$  jest jednoznacznie związane z  $E_{max}$  więc wyznaczenie  $\mu$  pozwala określić  $E_{max}$ . W praktyce, na podstawie znanych zależności  $\mu$  od  $E_{max}$  sporządza się wykresy zależności  $R_n(E_{max})$ , gdzie  $R_n$  oznacza grubość warstwy osłabiającej wiązkę cząstek  $\beta$  do  $1/2^n$  natężenia tej wiązki bez absorbentu. Wyznaczenie  $R_n$  pozwala na podstawie tych wykresów znaleźć  $E_{max}$ .

Zwykle mamy do czynienia z układami złożonymi i źródło emituje równocześnie promieniowanie  $\beta$  o różnych energiach maksymalnych. W takim przypadku krzywa absorpcji jest sumą składowych krzywych absorpcji odpowiadających tym różnym energią maksymalnym. Rozłożenie sumarycznej krzywej na składowe jest możliwe w przypadku, gdy dwie lub więcej energii  $E_{max}$  są stosunkowo odległe od siebie. Rys. 2 przedstawia przykład rozłożenia wypadkowej na składowe dla źródła emitującego promieniowanie  $\beta$  o dwu energiach  $E_{1max}$  i  $E_{2max}$ .



Rys. 2. Krzywa absorpcji promieniowania  $\beta$  dla źródła złożonego z preparatów o dwu energiach  $E_1$  i  $E_2$  ( $R_1$ ,  $R_2$  – zasięgi maksymalne) w skali półlogarymicznej.



## Pracownia Radioizotopowa

## Ćwiczenie 11

Przy dwu wartościach  $E_{max}$ , dla wygody położmy  $E_{1max} < E_{2max}$ , krzywa absorpcji może być przybliżona dla  $R > R_{1max}$  funkcją wykładniczą:

$$I = I_{02} \exp\left(-\frac{\mu_2}{\rho} R\right) \quad (2.3)$$

Na wykresie funkcji  $\ln I(R)$  jest wtedy linia prosta. Ekstrapolacja tej prostej do  $R=0$  (w skali półlogarytmicznej) jest wykresem krzywej pochłaniania  $I_2(R)$  dla widma promieniowania  $\beta$  z  $E_{max}=E_{2max}$ . Przechodząc dla tej krzywej absorpcji od zależności  $\ln I_2(R)$  do zależności  $I_2(R)$  i odejmując  $I_2(R)$  od zmierzonej krzywej absorpcji  $I(R)$  otrzymamy funkcję:

$$I_1(R) = I(R) - I_2(R) \quad (2.4)$$

przedstawiającą krzywą absorpcji dla promieniowania  $\beta$  z  $E_{max}=E_{1max}$ . Analiza krzywych absorpcji  $I_1(R)$  i  $I_2(R)$  oddzielnie pozwala wyznaczyć  $E_{1max}$  i  $E_{2max}$ .

Jeżeli zasięg wyrazimy w jednostkach gęstości powierzchniowej [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ] to wówczas zasięg  $R_{max}$  prawie nie zależy od rodzaju absorbenta, a jedynie od  $E_{max}$ . Zasięg  $R_{max}$ , można między innymi, oszacować z zależności empirycznych, znając energię  $E_{max}$  promieniowania  $\beta$  i na odwrót. Odpowiednie zależności podano poniżej z zakresem ich stosowalności:

Tabela 1.

$E_{max}$ [MeV]	Zasięg $R_{max}$ [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]
Poniżej 0,2	$R_{max} = \frac{1}{1,5} E^{5/3}$
Od 0,03 do 0,15	$R_{max} = 0,15E - 0,0028$
Od 0,15 do 0,8	$R_{max} = 0,407E^{1,38}$
Powyżej 0,8	$R_{max} = 0,542E - 0,133$
Powyżej 1,0	$R_{max} = 0,571E - 0,161$
$R_{max}$ [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]	Energia $E_{max}$ [MeV]
Poniżej 0,03	$E_{max} = 1,275R^{0,6}$
Od 0,002 do 0,02	$E_{max} = 6,67R + 0,0186$
Od 0,02 do 0,3	$E_{max} = 1,92R^{0,725}$
Powyżej 0,3	$E_{max} = 1,85R + 0,245$
Powyżej 0,4	$E_{max} = 1,75R + 0,281$

Ponieważ zasięg dla promieniowania  $\beta$  jest wielkością wyznaczoną przez ekstrapolowanie, często posługujemy się pojęciem pochłaniania połówkowego i grubością połówkową  $R_l$ .

Jeżeli zakładamy, że:

$$I_R = \frac{1}{2} I_0 \quad (2.5)$$

to uwzględniając wzór 2.1 otrzymujemy wyrażenie na grubość pochłaniania połówkowego:

$$R_l = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \quad (2.6)$$

Zależność  $R_l$  od  $E_{max}$  ma podobny charakter jak  $R(E)$ .



## Pracownia Radioizotopowa

## Ćwiczenie 11

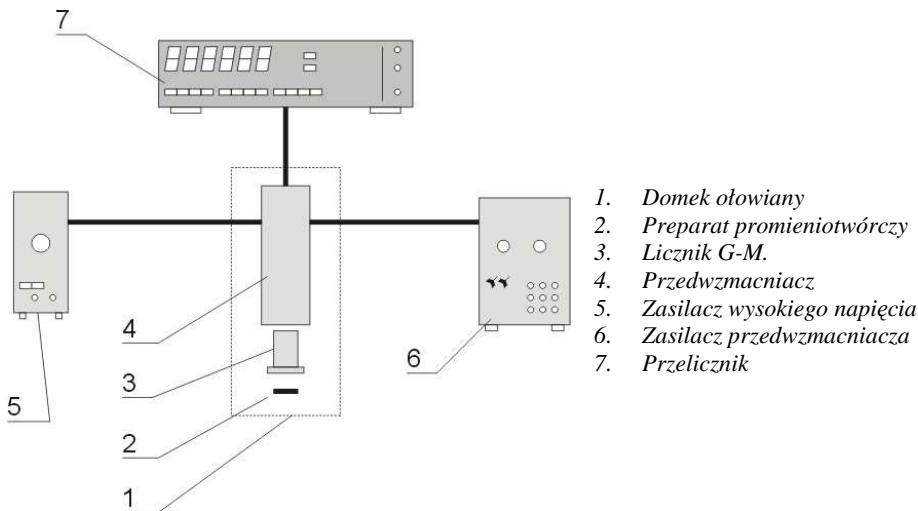
Do określenia  $\mu$  i  $R_1$  w aluminium dla danej energii  $E(\text{MeV})$  można (z dokładnością rzędu 20%) stosować empiryczne wzory:

$$\mu[\text{cm}^{-1}] = \frac{59,4}{E^{1,33}} \quad (2.7)$$

$$R_1[\text{cm}] = 0,015E^{1,33} \quad (2.8)$$

### III. Część doświadczalna

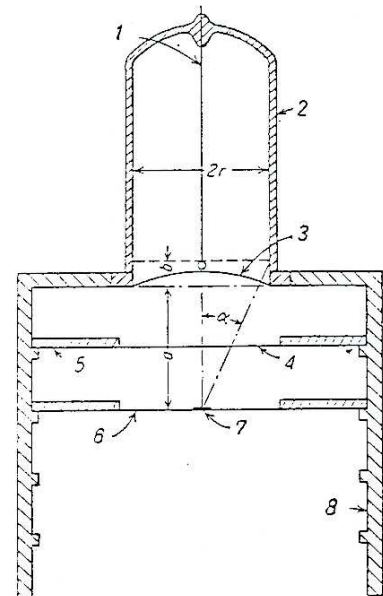
#### A. Schemat blokowy aparatury pomiarowej



Rys. 3. Schemat blokowy układu pomiarowego

Rys. 4. Geometria układu pomiarowego

- 1 – elektroda zbiorcza  
2 – ścianka licznika  
3 – okienko z cienkiej miki  
4 – przesłona z okrągłym otworem  
5 – podkładka źródła  
6 – źródło  
7 – wspornik wielopoziomowy ze szkła organicznego



#### B. Wykonanie ćwiczenia

1. Zapoznać się z układem pomiarowym i włączyć układ elektroniczny w obecności prowadzącego ćwiczenia.
2. Przed okienkiem licznika umieścić preparat promieniotwórczy. Rejestrować cząstki  $\beta$  w ciągu pewnego czasu  $t$ . Długość czasu  $t$  dobrać tak, aby błąd pomiaru nie przekraczał 2%. Należy pamiętać o zmierzeniu grubości warstwy powietrza między preparatem a okienkiem licznika.

##### Rada praktyczna:

Odległość między preparatem promieniotwórczym a okienkiem licznika dobrać tak aby liczba zliczeń wyniosła 5000 – 7000 zliczeń/minutę, zmierzyć liczbę zliczeń przypadającą na 2 minuty.



3. Nie zmieniając położenia źródła wstawiać kolejno folie aluminiowe i każdorazowo rejestrować cząstki  $\beta$  w ciągu czasu  $t_i$  dobranego zależnie od stopnia osłabienia wiązki (por. Rada praktyczna – niżej) otrzymane szybkości zliczeń są proporcjonalne do strumienia cząstek, które przeszły przez absorbent, dając w ten sposób zależność tej szybkości zliczeń od grubości absorbenta czyli krzywą absorpcji. Grubość warstwy absorbenta zmieniać od zera do wartości, przy której dalsze zwiększanie nie powoduje zmiany szybkości zliczeń (oczywiście z dokładnością do fluktuacji statystycznych) co oznacza, że zostało osiągnięte tło.

Rada praktyczna:

Kolejne zmiany grubości absorbenta powinny dawać osłabienia wiązki 15% - 30%. Czas trwania pojedynczego pomiaru powinien wynosić:

$t_1 = 2 \text{ min.} - 3 \text{ min.}$  dla  $I(R') > 1/2 I(0)$

$t_2 = 5 \text{ min.} - 7 \text{ min.}$  dla większych grubości absorbenta niż  $R'$ .

**C. Opracowanie wyników**

- Sporządzić wykresy funkcji:  $\ln I = f(R')$  i  $\ln I' = f'(R')$ , gdzie:  $I' = I - I_t$  a  $R' = R + \Delta R$ ;  
 $\Delta R$  – dodatkowa grubość absorbenta związana z obecnością warstwy powietrza między źródłem a licznikiem oraz okienka mikowego licznika G – M. Patrz na opis poprawek
- Ekstrapolując krzywą  $\ln I = f(R')$  do przecięcia z poziomem tła (ściślej  $\ln$  tła) znaleźć  $R_{max}$  i wyliczyć odpowiadającą mu wartość  $E_{max}$  na podstawie zależności podanych w części teoretycznej.
- W przypadku gdy kształt krzywej absorpcji wskazuje, że mamy do czynienia z jedną wartością  $E_{max}$  (widmo proste) ekstrapolować krzywą  $\ln I' = f'(R')$  do zerowej wartości  $R$ . z tak otrzymanego wykresu określić grubość częściowego pochłaniania  $R_n$  dla  $n=1$  i  $n=2$ , i posługując się odpowiednim wykresem zależności  $E_{max} = E_{max}(R_n)$ , określić  $E_{max}$ . Porównać ją z wartością otrzymaną w punkcie 2 oraz danymi literaturowymi.
- W przypadku gdy kształt krzywej absorpcji wskazuje, że mamy do czynienia z dwoma wartościami  $E_{max}$  (widmo złożone) opracować wyniki zgodnie z opisem w części teoretycznej.
- Wprowadzanie poprawek:
  - na czas rozdzielnicy:

Uwzględnić w przypadku, gdy czas rozdzielnicy licznika G – M jest większy niż  $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ .

Jeżeli czas rozdzielnicy  $\tau$  jest porównywalny ze średnim okresem między rejestrowanymi licznikiem cząstkami, to znaczna część cząstek zostanie pominięta w pomiarze. Jeżeli  $I_{exp}$  oznacza mierzoną szybkość zliczeń, to  $I_{exp}\tau$  jest tą częścią czasu, w której układ liczący jest nieczuły (pojawienie się w liczniku cząstki nie wytwarza impulsu). W rezultacie liczba pominiętych cząstek w jednostce czasu wyrazi się  $I_{exp} I_{fakt} \tau$ , w którym  $I_{fakt}$  oznacza szybkość zliczeń, którą wykazałby układ liczący o czasie rozdzielnicy pomijalnie małym. Wobec tego:

$$I_{fakt} - I_{exp} = I_{fakt} I_{exp} \tau$$

$$I_{fakt} = \frac{I_{exp}}{1 - I_{exp} \tau}$$

- na pochłanianie w powietrzu:

Przy grubszych warstwach powietrza pomiędzy źródłem a detektorem (lub w przypadku promieniowania  $\beta$  o małej energii) należy uwzględnić pochłanianie w tej warstwie. W tym celu oblicza się masową grubość tej warstwy  $R_{pp}$  stosując wzór:

$$R_{pp} = \rho h,$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość powietrza (uwzględniając aktualną temperaturę i ciśnienie);

$h$  – odległość źródła od detektora

Aktualne wartości  $\rho$  należy odczytać z tablic fizycznych. Tę wartość  $R_{pp}$  należy dobrać do grubości absorbenta lub ekstrapolować krzywą absorpcji w lewo do  $R - R_{pp}$ .



c) na absorpcję w detektorze:

Gdy mamy licznik o znanej grubości  $R_{pd}$  okienka to jego wpływ można uwzględnić ekstrapolując krzywą absorpcji promieniowania  $\beta$  o grubość okienka licznika  $R_{pd}$  (analogicznie jak przy uwzględnieniu warstwy powietrza). W naszym doświadczeniu stosujemy kielichowy licznik G – M z okienkiem mikowym o grubości  $R_{pd} = 1,5 \text{ mg/cm}^2$ .

d) na tło detektora:

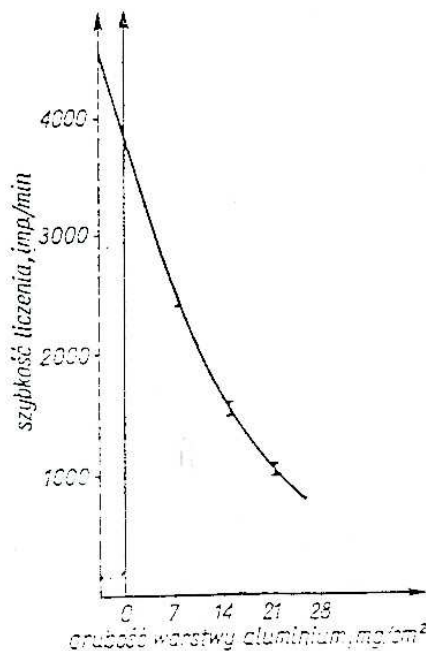
Poprawka ta łączy się z rejestrowaniem przez licznik innego rodzaju promieniowania niż badane promieniowanie  $\beta$  (np. kosmicznego) – jest to tzw. Tło detektora. Można to znacznie wyeliminować przez zastosowanie ołowianej obudowy licznika. Należy w nieobecności preparatu promieniotwórczego stwierdzić jak duża jest ta wielkość i zdecydować o jej wpływie.

Przy bardzo dokładnym opracowaniu widma promieniowania  $\beta$  powinno się uwzględnić jeszcze szereg innych poprawek, takich jak poprawki ze względu na kąt bryłowy, na samoabsorpcję, na rozpraszanie wsteczne, na promieniowanie  $\gamma$ , na elektrony konwersji wewnętrznej, na wydajność licznika na promieniowanie  $\beta$ , itp. W naszym doświadczeniu pominiemy te poprawki, natomiast wykonujący ćwiczenie powinien zdecydować, która z powyżej, szerzej opisanych poprawek jest w tym ćwiczeniu istotna.

## IV. Literatura

1. K. Małuszyńska, M. Przytuła, „Laboratorium fizyki jądrowej” [PWN, Łódź 1969];
2. T. Hilczer, „Ćwiczenia z fizyki jądrowej” [UAM, Poznań 1975];
3. William J. Price, „Detekcja promieniowania jądrowego” [PWT, Warszawa 1960];
4. Sz. Szczeniowski, cz. VI, „Fizyka doświadczalna. Fizyka jądra i cząstek elementarnych” [PWN, Warszawa 1974];
5. A. Strzałkowski, „Wstęp do fizyki jądra atomowego” [PWN, Warszawa 1969];
6. I. Kaplan, „Fizyka jądrowa” [PWN, Warszawa 1957];
7. K. N. Muchin, „Doświadczalna fizyka jądrowa” t. 1 i 2 [Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978];
8. M. Subotowicz, „Metody doświadczalne w fizyce ciała stałego” [Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Lublin 1976];
9. J. M. Massalski, „Detekcja promieniowania jądrowego”, [PWN, Warszawa 1959];
10. G. E. Pustowałow, „Fizyka atomowa i jądrowa”, [PWN, Warszawa 1975];
11. J. Araminowicz, K. Małuszyńska i inni, „Laboratorium fizyki jądrowej” [PWN, Warszawa 1974];

## V. Dodatki



Rys. 5. Krzywa absorpcji cząstek  $\beta$  wolframu.



Tabela 2. Orientacyjne grubości folii dla różnych energii maksymalnych.

$E_{\max}$ [MeV]	Grubość folii		$E_{\max}$ [MeV]	Grubość folii	
	[mm]	[g/cm <sup>2</sup> ]		[mm]	[g/cm <sup>2</sup> ]
0,15 – 0,20	0,01	2,7	1,5	0,2	54
0,30 – 0,40	0,02	5,4	2,0	0,3	81
0,50 – 0,70	0,05	13,5	2,5	0,4	108
0,80 – 1,0	0,1	27,0	3,0	0,5	135

Rys. 6. Graficzna metoda wyznaczania poprawki na pochłanianie w powietrzu i okienku detektora:

$R$  – grubość absorbenta podana w [g/cm<sup>2</sup>];

$R'$  – poprawka w [g/cm<sup>2</sup>].

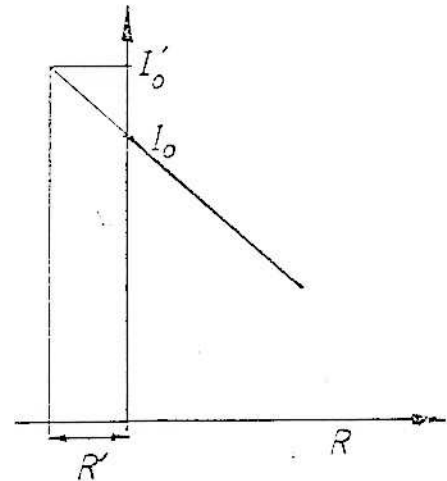


Tabela 3. Przepuszczalność ścianek i okienka licznika G – M dla cząstek  $\beta$ .

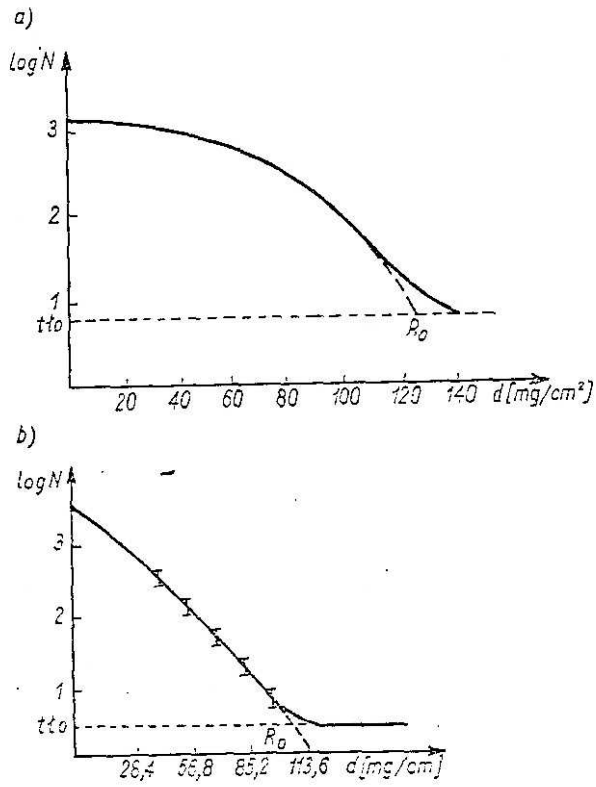
Źródło cząstek	Maksymalna energia cząstek $\beta$ [MeV]	Przepuszczalność		
		30 mg/cm <sup>2</sup>	4 mg/cm <sup>2</sup>	1,4 mg/cm <sup>2</sup>
<sup>14</sup> C	0,154	0,03	1,5	20
<sup>45</sup> Ca	0,250	1,5	38	82
<sup>90</sup> Sr	0,65	31	86	95
<sup>32</sup> P	1,7	72	95,5	98,5



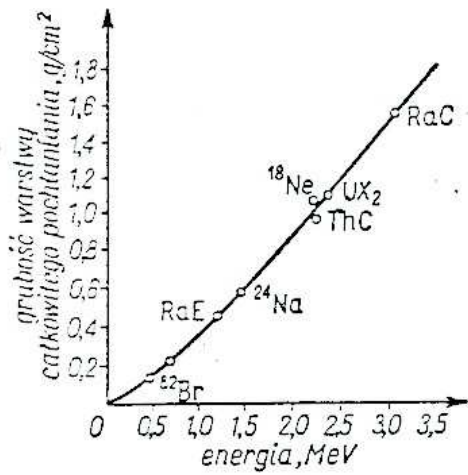


Pracownia Radioizotopowa

Ćwiczenie 11

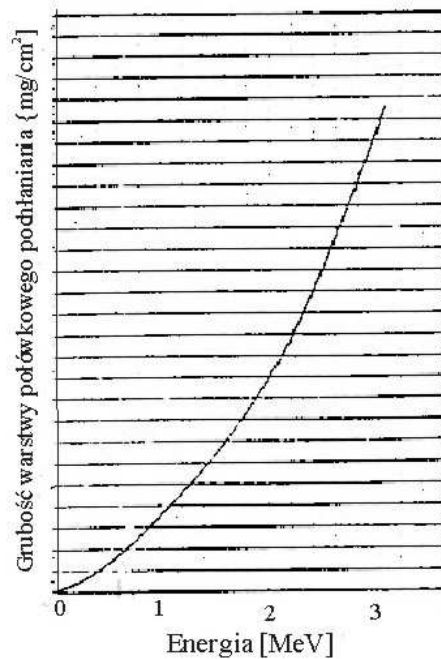


Rys. 7. a) Zmiana strumienia elektronów pierwotnie monoenergetycznych w zależności od grubości absorbentu (Al), b) Zmiana strumienia cząstek  $\beta$  w zależności od grubości absorbentu (Al).

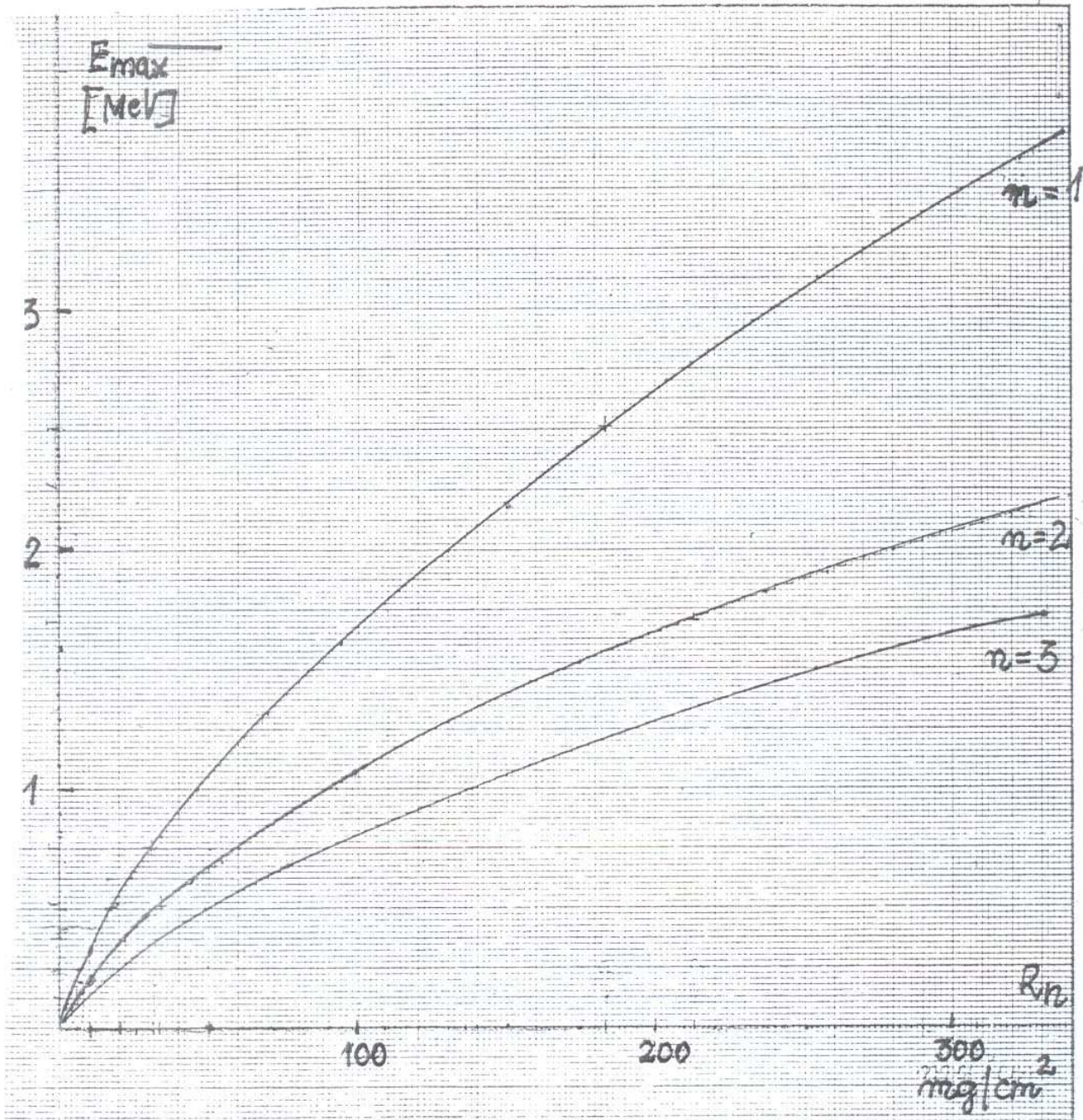


Rys. 8. Zależność grubości warstwy całkowitego pochłaniania od energii maksymalnej promieni  $\beta$ .

Rys. 9. Zależność warstwy pochłaniania półówkowej w aluminium od energii promieniowania  $\beta$ .







Rys. 10. Zależność między grubością cząstkowego pochłaniania cząstek  $\beta$ ,  $R_n$  i ich energią maksymalną  $E_{max}$ .  
 $R_n$  – oznacza grubość absorbenta osłabiającego wiązkę cząstek  $\beta$   $2^n$  razy.

$$I(R_n) = \frac{1}{2^n} I_0$$