

Wyznaczanie energii promieniowania γ pochodzącego ze źródła ^{60}Co metodą absorpcji

I. Zagadnienia

1. Procesy fizyczne prowadzące do emisji kwantów γ .
2. Prawo absorpcji. Oddziaływanie promieniowania γ z materią.
 - zjawisko fotoelektryczne;
 - efekt Comptona;
 - tworzenie par elektron – pozyton;
 - pojęcie liniowego i masowego współczynnika absorpcji.
3. Detekcja kwantów γ . Spektrometr γ :
 - sonda scyntylacyjna, procesy prowadzące do powstania impulsu elektrycznego w sondzie scyntylacyjnej.
4. Znajomość sposobu wykonania ćwiczenia, opracowanie wyników pomiarów i schemat rozpadu izotopu wykorzystywanego do badania absorpcji.

II. Wstęp teoretyczny

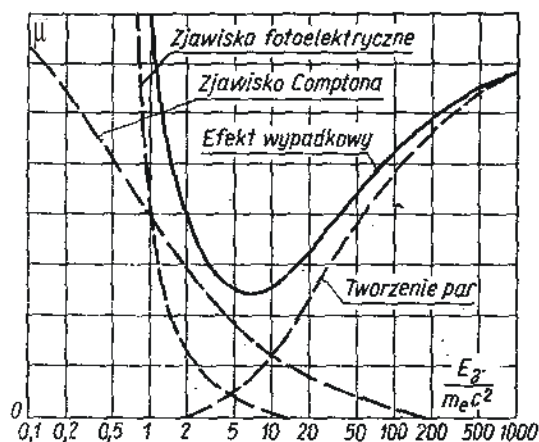
Promieniowanie γ jest krótkofalowym promieniowaniem elektromagnetycznym, powstającym w wyniku deekscytacji jądra atomowego. Jądro w stanie wzbudzonym przechodzi do niższego stanu energetycznego emitując kwant promieniowania. Rejestracja tego promieniowania odbywa się przez efekty wtórne, towarzyszące przechodzeniu promieniowania γ przez materię.

Promieniowanie γ przechodząc przez materię traci swoją energię w wyniku innych procesów niż cząstki naładowane. Dla promieniowania rzędu od 10 keV do 5 MeV najważniejszymi procesami są: efekt fotoelektryczny, zjawisko Comptona oraz zjawisko tworzenia par elektron – pozyton..

Całkowita strata energii jest sumą wymienionych procesów: w przypadku promieniowania γ operuje się zwykle pojęciem przekroju czynnego σ i dlatego sumaryczny przekrój czynny na pochłanianie promieniowania γ będzie sumą przekrojów czynnych na zajście wymienionych procesów.

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_c + \sigma_p \quad (1)$$

Zależność wartości względnej absorpcji μ od energii fotonów przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Przebieg przekrojów czynnych na absorpcję kwantów γ w ołowiu w funkcji energii dla każdego z trzech mechanizmów oddziaływania oraz całkowity przekrój czynny.

Efekt fotoelektryczny polega na pochłonięciu fotonu przez atom, przy czym energia fotonu γ zostaje przekazana jednemu z elektronów, w wyniku czego uzyskujemy fotoelektrony o energii:

$$E_e = E_\gamma - \bar{T}_j, \quad (2)$$

gdzie \bar{T}_j oznacza średnią energię jonizacji. Prawdopodobieństwo tego efektu silnie zależy od liczby porządkowej Z . Zjawisko fotoelektryczne ma praktyczne znaczenie przy energiach kwantu mniejszych od 0,5 MeV.

Jeżeli energia kwantu γ przewyższa znacznie energię wiązania elektronów w atomie, elektrony takie można traktować jako swobodne. Padający kwant γ o energii $h\nu$ rozprasza się na takich elektronach, dając w wyniku kwant o energii $h\nu'$. Kierunek rozproszonego fotonu jest na ogół inny niż kierunek fotonu padającego. Elektron rozpraszający otrzymuje przy tym energię:

$$E_e = h\nu - h\nu', \quad (3)$$

oraz pęd:

$$p_e = \frac{h\nu}{c} - \frac{h\nu'}{c} \cos\theta \quad (4)$$

gdzie θ jest kątem rozproszenia elektronu względem kierunku wiązki pierwotnej

Widmo promieniowania rozproszonego zawiera oprócz promieniowania pierwotnego o długości fali λ linię przesuniętą o $\lambda' > \lambda$. Wielkość $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ rośnie ze wzrostem kąta rozproszenia, nie zależy natomiast od rodzaju substancji rozpraszającej.

Korzystając z zasady zachowania energii i pędu można wyprowadzić wzór na $\Delta\lambda$.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \Lambda(1 - \cos\theta) \quad (5)$$

gdzie $\Lambda = \frac{h}{m_e c} = 2,42 \cdot 10^{-10} \text{ cm}$ – comptonowska długość fali elektronu.

Zjawisko Comptona jest zjawiskiem dominującym przy energiach kwantów γ z przedziału 0,5 – 5 MeV.

Przy większych energiach kwantów γ może wystąpić zjawisko tworzenia par elektron – pozyton. Proces ten zachodzi w polu jądra lub elektronu. W zjawisku tym kwant γ ulega całkowitej absorpcji, a pojawia się para elektron i pozyton. Zjawisko tworzenia par może zachodzić wtedy gdy energia kwantu γ jest większa od energii $2m_0c^2$, gdzie m_0c^2 – energia spoczynkowa elektronu.

Detekcja promieniowania γ polega na detekcji wtórnych elektronów. Do detekcji promieniowania γ można użyć dowolnego detektora z tym jednak, że do pomiarów ilościowych nadają się tylko takie, w których procesy straty energii promieniowania γ odbywa się w objętości czynnej. Zwykle do takich pomiarów stosuje się komory jonizacyjne o specjalnej konstrukcji i detektory scyntylicyjne.

Urządzenie pomiarowe pracujące z licznikiem scyntylicyjnym zawiera scyntylator, fotopowielacz elektronowy ze stabilizowanym zasilaczem wysokiego napięcia, liniowy wzmacniacz impulsów, dyskryminator amplitudy impulsów i urządzenie rejestrujące.

Scyntylatorami są substancje, w których pod wpływem padającego promieniowania zachodzi zjawisko luminescencji. Mogą nimi być kryształy nieorganiczne (NaI), organiczne (antracen, naftalen) i niektóre roztwory organiczne.

Fotopowielaczami nazywa się lampę próżniową zawierającą fotokatodę, kilka (kilkanaście) dynod i anodę.

Zasada działania takiego licznika opiera się na kilku procesach. Cząstka naładowana gdy przechodzi przez scyntylator traci energię na jonizację i wzbudzenie drobin scyntylatora. Część tej energii zostaje wypromieniowana w postaci fotonów światła widzialnego lub ultrafioletu. Niektóre z nich padając na fotokatodę fotopowielacza wybijają z niej fotoelektrony. Elektrony te, pod wpływem różnicy potencjałów, zostają przyspieszane i mogą wybijać kolejne elektrony z dynod. Taka lawina elektronów jest zbierana na anodzie i daje skok napięcia na oporze anodowym. Dalsze urządzenia wzmacniają i rejestrują impulsy.

Przechodząc przez warstwę absorbenta część promieniowania zostaje pochłonięta. Natężenie wiązki po przejściu przez absorbent wynosi:

$$I = I_0 \exp(-\mu X) \quad (6)$$

lub

$$I = I_0 \exp(-\mu_m R) = I_0 \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} X \rho\right) \quad (7)$$

gdzie I – strumień cząstek γ przechodzących przez absorbent o grubości X , I_0 – strumień cząstek γ w nieobecności absorbenta, μ – liniowy współczynnik absorpcji [cm^{-1}], ρ – gęstość środowiska pochłaniającego [g/cm^3], X – grubość

warstwy absorbenta [cm], R – masowa grubość absorbenta [g/cm^2], $\mu_m = \mu/\rho$ – masowy współczynnik pochłaniania [cm^2/g].

Powyższy wzór jest słuszny jeżeli: promieniowanie γ jest monoenergetyczne, skolimowane w małym kącie bryłowym, a warstwa absorbenta nie przekracza kilku zasięgów połówkowych.

Całkowity liniowy współczynnik absorpcji wynosi:

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_p \quad (8)$$

gdzie μ_f , μ_c i μ_p – współczynniki odpowiadające odpowiednio: procesom fotoreakcji, zjawisku Comptona i zjawisku tworzenia się par elektron – pozyton.

Oslabienie wiązki promieniowania można również scharakteryzować przy pomocy tzw. grubości połówkowej $X_{1/2}$. Jest to grubość absorbenta osłabiająca natężenie wiązki do połowy wartości początkowej.

Wzór

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu X \quad (9)$$

dla $X = X_{1/2}$ przyjmuje postać:

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\mu X_{1/2} \quad (10)$$

Zatem

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln 2}{X_{1/2}} \quad (11)$$

Jeżeli posłużyć się masową grubością absorbenta, to otrzymamy: $R_{1/2} = \rho X_{1/2}$, więc

$$\mu = \frac{\ln 2}{R_{1/2}} \quad (12)$$

W przypadku promieniowania γ pojęcie zasięgu nie jest zbyt odpowiednie gdyż można tu mówić jedynie o prawdopodobieństwie przebycia pewnej odległości. Najlepiej posługiwać się pojęciem średniego zasięgu. Średni zasięg oznacza średnią odległość jaką przebywają fotony zanim ulegną oddziaływaniu i jest określony wzorem:

$$\bar{X} = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} \mu dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} \mu dx} = \frac{1}{\mu} \quad (13)$$

gdzie: x – grubość absorbenta.

Jak widać, średni zasięg jest równy odwrotności liniowego współczynnika absorpcji. Zgodnie z 2.11 mamy ponadto:

$$X_{1/2} = \bar{X} \ln 2 = 0,693 \bar{X} \quad (14)$$

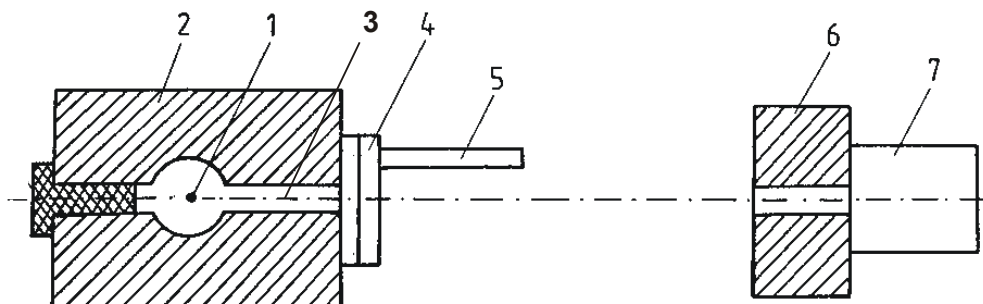
Analogicznie do \bar{X} można zinterpretować \bar{R} (średni zasięg masowy) i wtedy:

$$\bar{R} = \rho \bar{X} = \frac{1}{\mu_m} \quad (15)$$

III. Część doświadczalna

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie energii promieniowania γ pochodzącego ze źródła ^{60}Co metodą absorpcji.

A. Schemat blokowy aparatury pomiarowej:



Rys. 2. Geometria układu pomiarowego.

1. źródło kwantów γ - ^{60}Co ;
2. osłona źródła z otworem wylotowym;
3. otwór wylotowy;
4. płytki absorbenta;
5. pręt do podwieszania płytek absorbenta;
6. osłona licznika z otworem dla przepuszczania kwantów γ ;
7. licznik scyntylacyjny.

B. Wykonanie ćwiczenia

1. Po zapoznaniu się z układem pomiarowym w obecności prowadzącego ćwiczenie uruchomić układ elektroniczny. Należy zwrócić uwagę na geometrię układu. Licznik powinien stać tak, by osie symetrii otworu wylotowego w osłonie źródła i osłonie licznika leżały na jednej prostej, przy czym odległość otworu obudowy źródła od okenka licznika powinna wynosić 60 – 80 cm.
2. Zmierzyć tło licznika (w czasie $t=100\text{s}$). Pomiar tła powtórzyć kilkakrotnie w celu sprawdzenia poprawności pracy układu.
3. Przeprowadzić trzy serie pomiarowe absorpcji promieniowania dla trzech różnych rodzajów absorbentów. Czas pomiaru każdego punktu pomiarowego ustawić na 100s. Grubość absorbentów zwiększać aż do uzyskania co najmniej czterokrotnego osłabienia natężenia pierwotnego promieniowania.
4. Wyniki pomiarów zebrać w tabelach pomiarowych, których wzory znajdują się poniżej.

Tabela nr 1 – pomiar tła.

t [s]	N_t	$u(N)$	N_{sr}	I	$u(I)$	I_{sr}	$u(I_{sr})$

Tabela nr 2 – pomiar absorpcji

R [cm]	R [g/cm ²]	N	$N'=N-N_{tla}$	I	$I'=I-I_{tla}$	$u(I')$	$\ln I'$	$U(\ln I')$

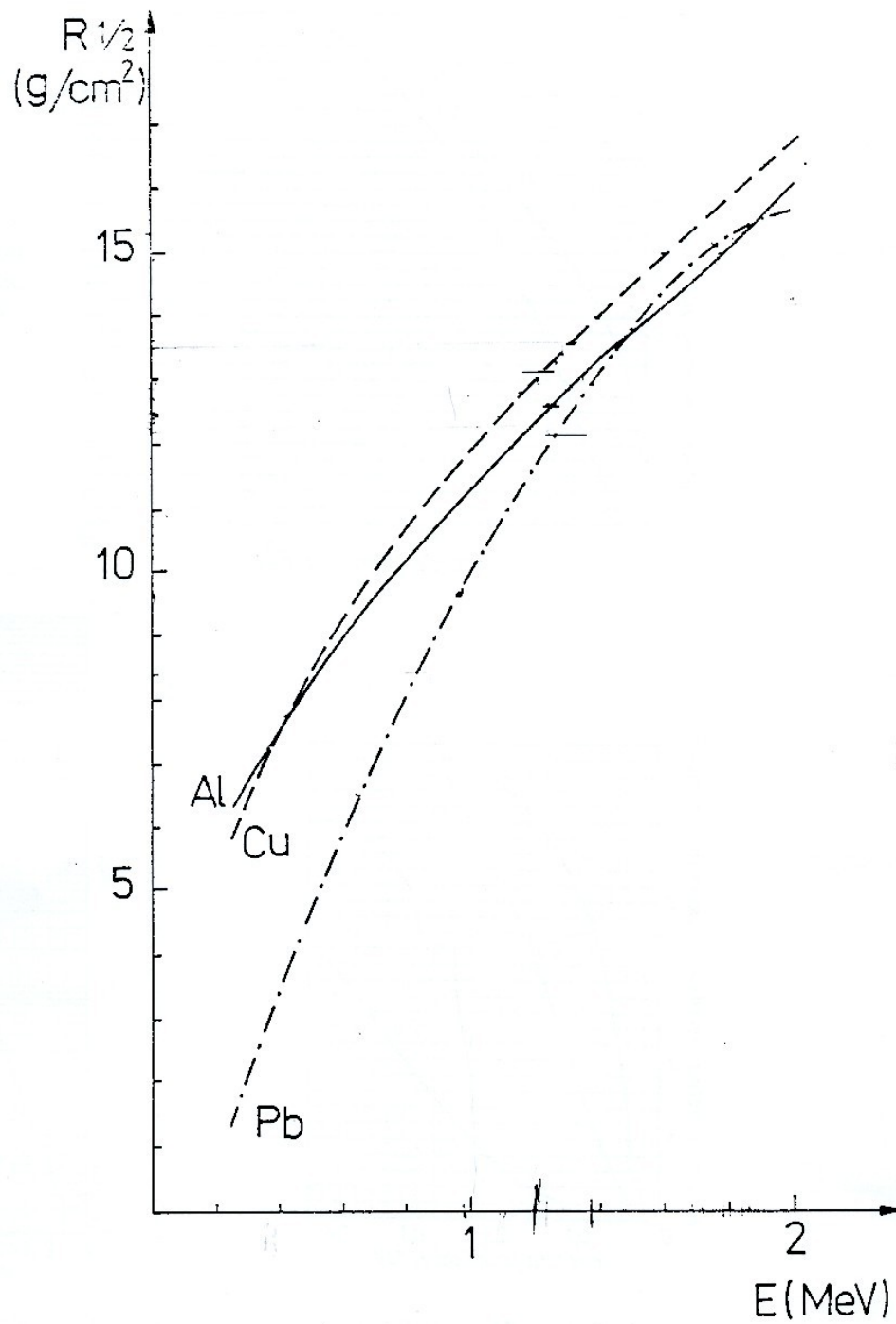
C. Opracowanie wyników

1. Sporządzić wykresy uzyskanych wyników w skali półlogarytmicznej. Na osi rzędnych odłożyć $\ln I(R)$, na osi odciętych $R[\text{g}/\text{cm}^2]$. Wskazane byłoby naniesienie tych prostych na jeden wykres, w celu porównania właściwości absorpcyjnych poszczególnych próbek. Kształt krzywej wskaże rodzaj wiązki promieniowania γ oraz tryb dalszego opracowania wyników. Na wykres należy nanieść niepewność pomiaru oraz przedyskutować przyczyny jego powstania. Należy szczególnie pamiętać o poprawce na tło.
2. Określić z wykresów grubość warstwy pochłaniania połówkowego $R_{1/2}$ dla każdego rodzaju absorbenta.
3. Posługując się odpowiednimi wykresami zależności między $R_{1/2}$ a energią fotonów określić energię promieniowania dla każdego absorbenta oddzielnie (rys. 3).
4. Znaleźć średnią wartość energii fotonów γ i porównać ją z wartościami katalogowymi energii fotonów γ emitowanych przez ^{60}Co . Przedyskutować ewentualne rozbieżności.
5. Wszystkie potrzebne do opracowania wyników wykresy i dane katalogowe są podane jako dodatek do instrukcji lub znajdują się u prowadzącego pracownię.

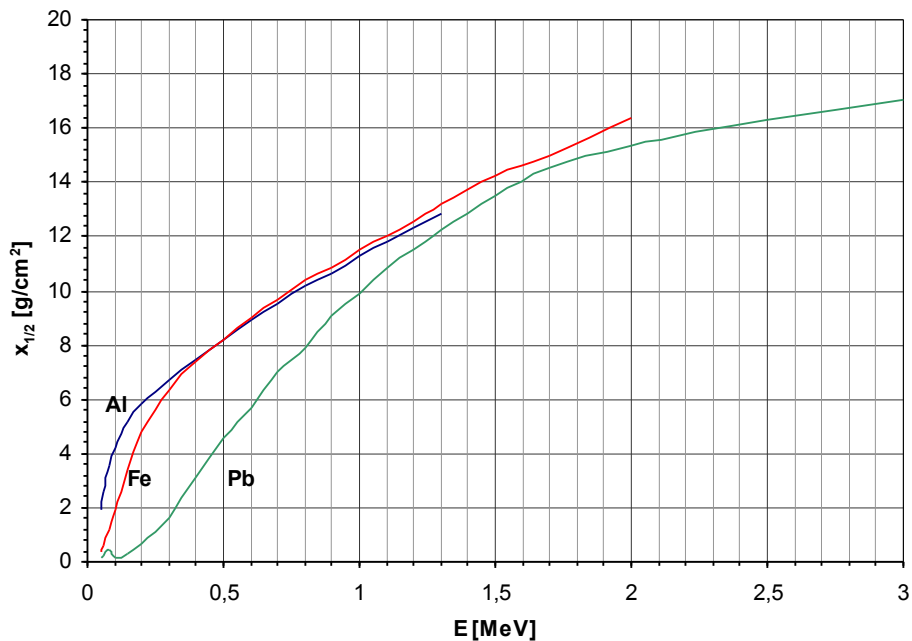
IV. Literatura

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];
12. H. Hart, E. Karstens, „Izotopy promieniotwórcze w zastosowaniu do pomiaru grubości” [PWT, Warszawa 1960];
13. W. I. Goldanski, „Statystyka pomiarów przy rejestracji promieniowania jądrowego” [PWN, Warszawa 1963];

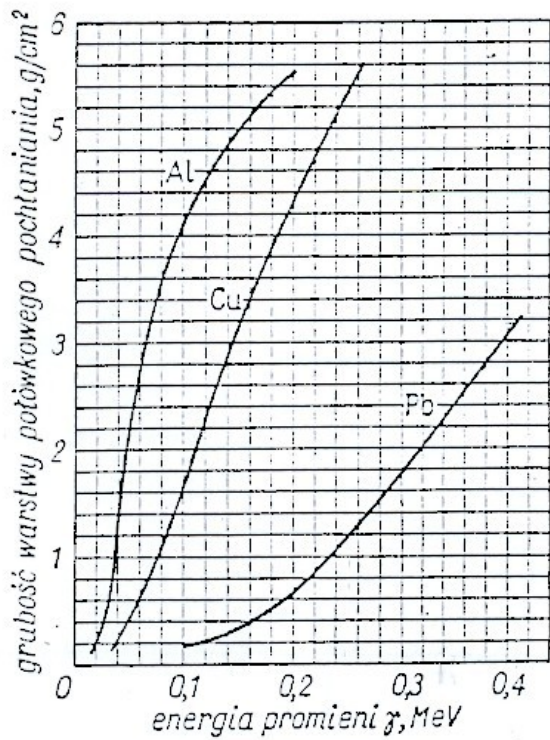
V. Dodatki



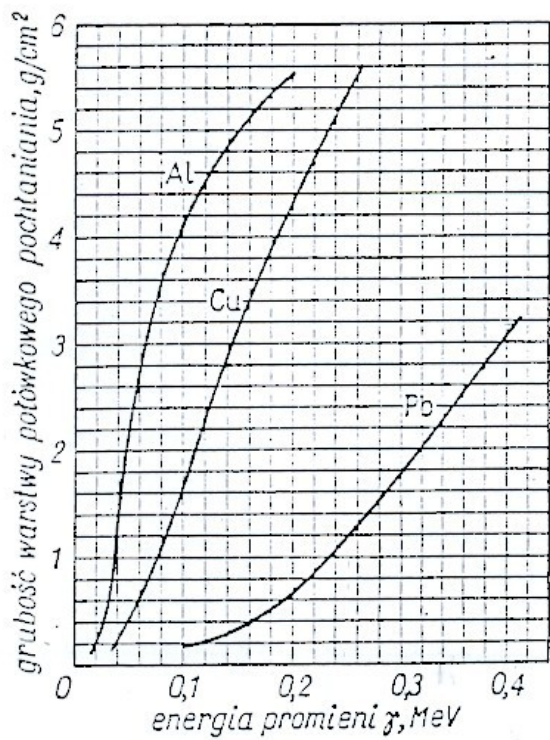
Rys. 3. Zależność między grubością warstwy pochłaniania połówkowego a energią fotonów.



Rys. 4. Grubość warstwy połówkowej w zależności od energii promieniowania twardych kwantów gamma (do 3 MeV).

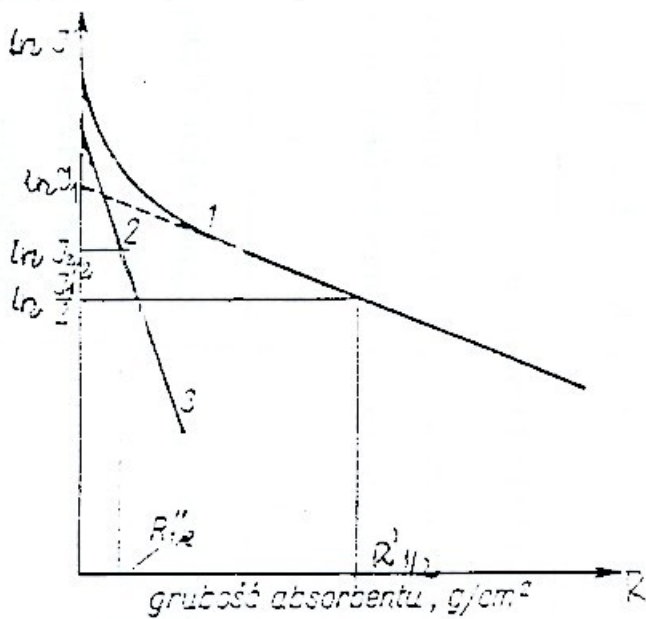


Rys. 5. Zależność grubości warstwy pochłaniania połówkowego od energii promieniowania dla kwantów γ średniej twardości (do 0,4 MeV).



Rys. 6.

Zależność grubości warstwy pochłaniania połówkowego od energii promieniowania miękkich kwantów γ .



Rys. 7. Schematyczna krzywa absorpcji złożonego promieniowania γ .
 1 – krzywa rozpadu złożonego;
 2 – składowa twarda;
 3 – składowa miękka.