
 <b>POLITECHNIKA OPOLSKA</b>	KATEDRA FIZYKI	
	LABORATORIUM FIZYKI	
<b>WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ABSORPCJI PROMIENIOWANIA GAMMA</b>		

## WSTĘP

W roku 1911 Ernest Rutherford przedstawił pogląd, że dodatni ładunek jest skupiony w środku atomu w postaci jądra, które zawiera też praktycznie całą masę atomu. Jądra, jak dziś dobrze wiemy, są zbudowane z protonów i neutronów. Liczbę protonów w jądrze (liczba atomowa) oznaczamy symbolem  $Z$ , zaś liczbę neutronów symbolem  $N$ . Łączną liczbę protonów i neutronów w jądrze nazywamy liczbą masową  $A$ :

$$A = Z + N \quad (1)$$

Neutrony i protony - gdy odnosimy się do nich łącznie - nazywamy nukleonami. W przypadku gdy interesują nas właściwości jąder jako samodzielnych obiektów (a nie jako części atomów), nazywamy je nuklidami. Do oznaczania nuklidów używamy następującego zapisu:

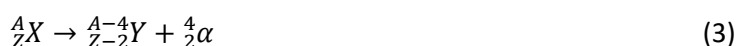
$${}^A_ZX \quad (2)$$

Dla przykładu rozważmy symbol  ${}^{197}_{79}\text{Au}$ . Wskaźnik górny 197 oznacza wartość liczby masowej  $A$ . Symbol  $\text{Au}$  informuje, że dany pierwiastek to złoto, którego liczba atomowa  $Z = 79$ . Z równania (1) można wyznaczyć liczbę neutronów w nuklidzie:  $197 - 79 = 118$ .

Nuklidy o tej samej liczbie atomowej  $Z$ , różniące się liczbą neutronów, nazywamy izotopami (np. złoto ma 32 izotopy od  ${}^{197}_{79}\text{Au}$  do  ${}^{204}_{79}\text{Au}$ ). Nuklidy (naturalne lub otrzymane w sposób sztuczny) ulegające rozpadowi promieniotwórczemu noszą nazwę promieniotwórczych albo radioaktywnych. Z natury nuklid promieniotwórczy jest nietrwały i chcąc osiągnąć niższy stan energetyczny spontanicznie emituje pewną cząstkę, ulegając przemianom w inny nuklid, który również może być radioaktywny.

Rozpady promieniotwórcze dzieli się na typy w zależności od rodzaju cząstek emitowanych w rozpadzie. Poniżej wymieniono i krótko scharakteryzowano podstawowe typy rozpadów promieniotwórczych.

1. **Rozpad  $\alpha$** , to proces, podczas którego z ulegającego rozpadowi jądra emitowane jest cząstka  ${}^4_2\alpha$  (jądro atomu helu  ${}^4_2\text{He}$ ), co zapisuje się w sposób schematyczny:



Powstający w tym rozpadzie atom końcowy  $Y$  ma o dwa protony mniej niż atom początkowy  $X$  (reguła przesunięć).

2. **Rozpad  $\beta$  minus**. W tej przemianie z jądra emitowany jest elektron  $\beta^-$ , zwany cząstką beta minus, oraz neutrino  $\bar{\nu}_e$  (tzw. antyneutrino elektronowe) o zerowej masie spoczynkowej i zerowym ładunku elektrycznym. Schematyczny zapis tej przemiany jest następujący:



Ze względu na zwiększenie ładunku elektrycznego jądra  $Y$ , atom końcowy ma o jeden proton więcej niż atom  $X$ .

3. **Rozpad  $\beta$  plus** polega na wystąpieniu z jądra pozytonu  $\beta^+$  (elektronu dodatniego - pozytonu), zwanego cząstką beta plus, i neutrino elektronowego  $\nu_e$ . Schematyczny zapis tej przemiany ma postać:



Atom końcowy  $Y$  ma o jeden proton mniej niż atom  $X$ .

4. **Przemiana  $\gamma$**  jest przejściem jądra od stanu wzbudzonego do stanu o niższej energii, z którym związana jest emisja kwantu promieniowania elektromagnetycznego (fotonu), nazywanego kwantem  $\gamma$  dla podkreślenia jego jądrowego pochodzenia. Co schematycznie da się zapisać:



gdzie symbol (\*) oznacza stan wzbudzony jądra X.

Podczas przemiany  $\gamma$  jądra liczby atomowe i masowe pozostają nie zmienione; zmienia się tylko struktura jądra od konfiguracji nukleonów odpowiadającej wyższej energii do konfiguracji odpowiadającej niższej energii.

Kwant  $\gamma$  unosi uwalnianą przez jądro energię. Emisji kwantu  $\gamma$  może również towarzyszyć rozpad  $\alpha$  lub  $\beta$ .

W procesie rozpadu promieniotwórczego liczba jąder ulegających rozpadowi maleje z czasem. Liczne doświadczenia wykazały, że w równych odstępach czasu liczba radioaktywnych jąder danego izotopu dowolnego pierwiastka maleje tę samą ilość razy. Czas  $T$ , w którym liczba nuklidów zmaleje o połowę nazywa się czasem połowicznego rozpadu (zaniku). Prawo rządzące rozpadem promieniotwórczym ma charakter statystyczny, tzn. że nigdy nie możemy przewidzieć czy lub które jądro rozpadnie się. Dla wszystkich jąder tego samego rodzaju prawdopodobieństwo ich rozpadu ma taką samą wartość, bez względu na to jak długo już żyją. Na przykład połowa jąder izotopu o czasie połowicznego zaniku wynoszącego 1 rok ulegnie rozpadowi w pierwszym roku, ale każde z jąder które przetrwało w tym czasie ma wciąż 50% szans przeżycia w kolejnym roku. Jeśli jądro przetrwa okres dwóch lat, to w trzecim roku prawdopodobieństwo jego rozpadu ciągle wynosi 50%.

Oznaczmy przez  $N_0$  liczbę zawartych w źródle jąder atomów promieniotwórczych w chwili początkowej  $t_0 = 0$ . Wskutek rozpadów po upływie czasu  $t$  liczba jąder, która nie uległa rozpadowi zmniejszy się do  $N$ , co można wyrazić wzorem (prawem rozpadu promieniotwórczego) (7):

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (7)$$

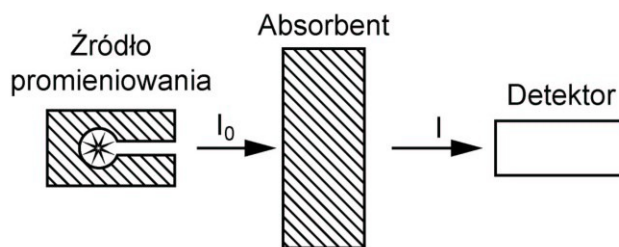
w którym  $\lambda$  jest wielkością charakterystyczną i stałą dla każdego nuklidu promieniotwórczego, zwaną stałą rozpadu. Jej jednostką w układzie SI jest odwrotność sekundy ( $s^{-1}$ ).

Stała rozpadu  $\lambda$  i czas połowicznego zaniku  $T$  są związane prostym wzorem postaci:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda} \quad (8)$$

Nuklid promieniotwórczy może być również opisany tzw. średnim czasem życia  $\tau$ , który jest odwrotnością stałej rozpadu  $\lambda$ . W okresie równym średniemu czasowi życia początkowa liczba nuklidów  $N_0$  ulega e-krotnemu zmniejszeniu ( $e$  – to liczbą Eulera, podstawa logarytmów naturalnych).

Właściwości promieniowania jądrowego ujawniają się w jego oddziaływaniu z materią. Inny jest charakter tego oddziaływania naładowanych cząstek  $\beta$  czy cięższych  $\alpha$ , a inny dla kwantów  $\gamma$ . Eksperymenty mające na celu zbadanie oddziaływania cząstek z materią przeprowadza się dla wszystkich rodzajów cząstek promieniowania w układzie, który w sposób schematyczny pokazano na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru absorpcji promieniowania jądrowego.

Źródło promieniowania jądrowego składa się z radioaktywnego preparatu zamkniętego wewnątrz grubościennnej osłony zaopatrzonej w mały otwór, przez który promieniowanie w postaci skupionej wiązki wydobywa się na zewnątrz. Osłonę z otworem, względnie inne urządzenie umożliwiające uzyskanie wąskiego strumienia cząstek, nazywamy kolimatorem. Strumień cząstek o natężeniu  $I_0$  (przypadająca na jednostkę czasu liczba cząstek) wychodzących z kolimatora wnika do badanego materiału (absorbenta) o określonej grubości warstwy  $x$ . W wyniku oddziaływania promieniowania z materią absorbenta cząstki o określonej energii ulegają procesom rozpraszania i wylatują z niego z różnymi energiami i pod różnymi kątami względem pierwotnego kierunku padania. W pewnych warunkach może dochodzić do

powstawania (krecacji) nowych cząstek. Konsekwencją oddziaływań cząstek promieniowania z atomami (w tym jądrami) absorbenta, będzie niższa (od  $I_0$ ) wartość natężenia cząstek  $I$  rejestrowanych przez detektor.

Fale elektromagnetyczne stowarzyszone z kwantami promieniowania  $\gamma$  posiadają długości z przedziału  $10^{-10} - 10^{-15}$  m, którym odpowiada zakres energii od 0.5 MeV – 1 GeV (*megaelektronowolty, gigaelektronowolty*). Promieniowanie  $\gamma$  cechuje duża zdolność przenikania materii, oddziałując z jej elektronami, jądrami, polami magnetycznymi elektronów i tworzonymi przez jądra polami elektrycznymi. Wymienione rodzaje oddziaływań mogą prowadzić do całkowitej absorpcji lub też do rozproszenia promieniowania  $\gamma$ . W praktyce wyróżniamy trzy zjawiska, które odgrywają istotną rolę w procesach oddziaływania promieniowania  $\gamma$  z materią:

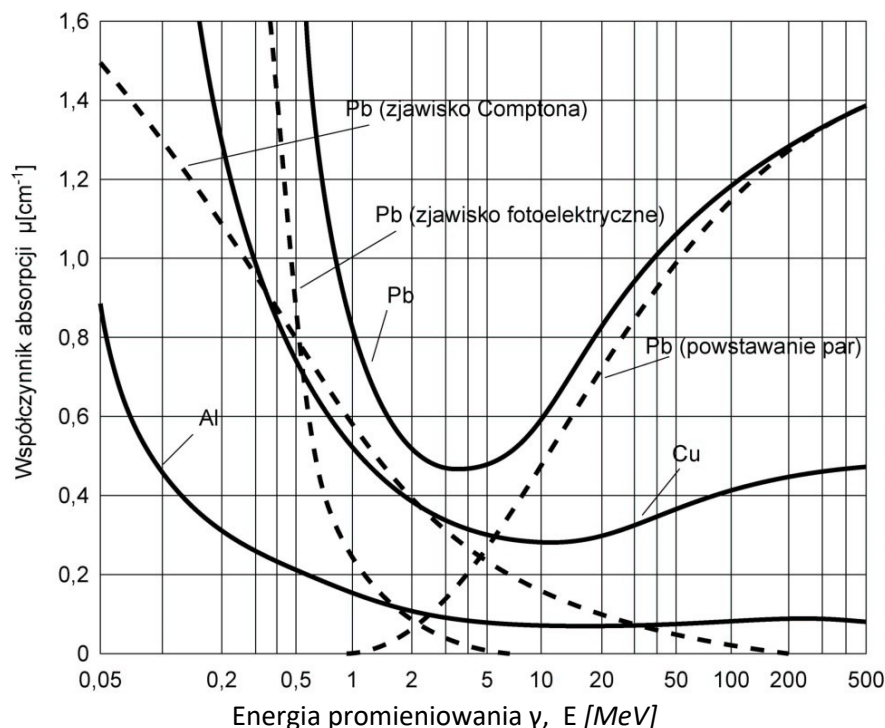
1. Absorpcja fotoelektryczna, polegająca na całkowitym przekazaniu przez kwant  $\gamma$  energii jednemu z elektronów powłoki elektronowej atomu i oderwaniu go od atomu (jonizacja).
2. Rozproszenie komptonowskie, które zachodzi wówczas, gdy kwant  $\gamma$  zderzy się sprężysto z jednym z elektronów swobodnych lub z elektronem względnie słabo związanym (o energii wiązania dużo mniejszej od energii kwantu, tak że można go uważać za elektron swobodny). W wyniku tego procesu w pierwotnym miejscu kwantu pojawia się rozproszony kwant o mniejszej energii.
3. Zjawisko tworzenia par, występuje gdy kwant  $\gamma$  wlatujący w obszar pola elektrycznego jądra atomu absorbentu posiada energię większą od 1,02 MeV. Skutkiem oddziaływania kwantu z polem jądra jest jego anihilacja (zniknięcie) z natychmiastową krecacją pary cząstek elektron-pozyton.

Makroskopowym skutkiem wyżej wymienionych procesów oddziaływania jest zmniejszanie się natężenia  $I_x$  strumienia kwantów ze wzrostem grubości  $x$  absorbentu przez który przenika promieniowanie  $\gamma$ . Zależność ta opisana jest tzw. prawem osłabiania Lamberta-Beera, wyrażonym wzorem:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (9)$$

w którym:  $I_0$  oznacza natężenie wiązki promieniowania wnikającego do absorbentu,  
 $I_x$  jest natężeniem wiązki promieniowania po przejściu przez warstwę absorbentu o grubości  $x$ ,  
 $\mu$  to całkowity liniowy współczynnik absorpcji (osłabiania).

Należy dodać, że powyższe równanie jest słuszne w warunkach dobrej geometrii, tzn. gdy wiązka promieni  $\gamma$  jest równoległa i wąska.



**Rys. 2.** Energetyczna zależność liniowych współczynników absorpcji promieniowania  $\gamma$  dla ołowiu (Pb), miedzi (Cu) i aluminium (Al).

Całkowity liniowy współczynnik absorpcji  $\mu$  jest sumą cząstkowych liniowych współczynników osłabiania: dla zjawiska fotoelektrycznego, zjawiska Comptona i procesu tworzenia par. Wkład innych oddziaływań jest tak mały, że można go pominąć. Wartość  $\mu$  silnie zależy od materiału absorbentu i energii kwantów promieniowania  $\gamma$ . Na Rys. 2. pokazano zależne od energii kwantów  $\gamma$  zmiany wartości liniowych współczynników absorpcji dla każdego z omówionych procesów w ołowiu (krzywe przerywane) oraz zmiany wartości całkowitego współczynnika absorpcji dla ołowiu (Pb), miedzi (Cu) i aluminium (Al) (krzywe ciągłe).

Opisując właściwości absorpcji promieniowania  $\gamma$  przez różne materiały, często stosuje się takie wielkości, jak:

- masowy współczynnik pochłaniania  $\mu_m$  charakteryzujący absorbent o gęstości masy  $\rho$ :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{cm^2}{g} \right] \quad (10)$$

- grubość połowkowego osłabiania  $x_{1/2}$ , po pokonaniu której natężenie strumienia promieniowania  $\gamma$  zmniejsza się do połowy wartości początkowej ( $I_x = 0.5 \cdot I_0$ ):

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} [cm] \quad (11)$$

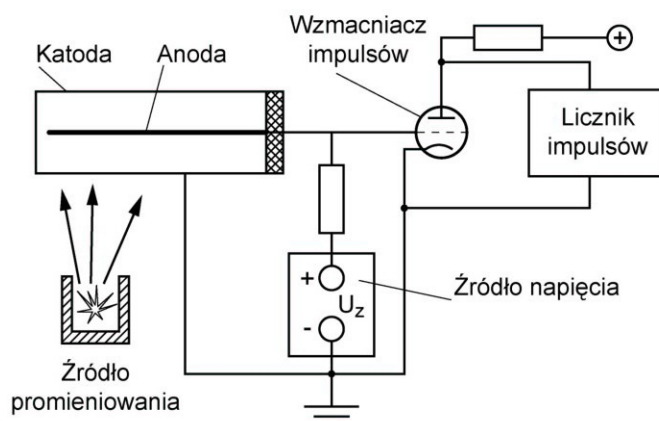
Bardzo często w analizach danych z pomiarów korzysta się z logarytmicznej równania (9) opisującego prawo pochłaniania:

$$\ln(I_x) = -\mu \cdot x + \ln(I_0) \quad (12)$$

Do rejestracji promieniowania jądowego stosuje się cały szereg różnych detektorów jak: płyty fotograficzne, komory Wilsona, liczniki krystaliczne, komory pęcherzykowe, liczniki scyntylacyjne oraz liczniki Geigera-Müllera. Ponieważ w niniejszym ćwiczeniu pomiary będą wykonywane ostatnim z wymienionych, dlatego krótko omówimy jego budowę i zasadę działania.

### UKŁAD ZLICZAJĄCY Z LICZNIKIEM GEIGERA-MÜLLERA

Licznik Geigera-Müllera (licznik G-M) należy do grupy detektorów jonizacyjnych. Zasada działania tych detektorów polega na rejestracji prądu jonowego, wytworzonego w przestrzeni wewnątrz detektora. Na Rys. 3. pokazano schemat licznika G-M i typowy sposób jego połączenia do układu elektronicznego.



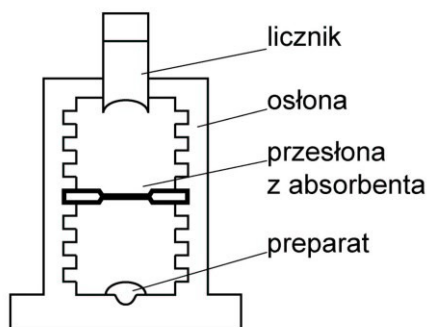
Rys. 3. Schemat budowy i układu elektronicznego z licznikiem Geigera-Müllera.

Licznik G-M posiada zwykle kształt walca. Składa się z rurki wypełnionej gazem i dwu elektrod wbudowanych do jej wnętrza. Elektrode wewnętrzzną (anodę) stanowi cienki drut o średnicy około 0,1 mm zwykle wykonany z wolframu. Druga elektroda (katoda) stanowi z reguły powłokę licznika. W licznikach metalowych powłoka bezpośrednio pełni funkcję katody, natomiast w licznikach o konstrukcji szklanej katodę tworzy się pokrywając szkło warstwą przewodzącą. Komora licznika G-M wypełniona jest mieszaniną gazu szlachetnego i par związków organicznych. Między elektrody przykłada się stałe napięcie, zwykle o wartości ok. kilkuset woltów, odpowiedzialne za wytworzenie stałego pola elektrycznego między

elektrodami. Przelatujące przez komorę licznika G-M wysokoenergetyczne fotony  $\gamma$  jonizują zawarty w niej gaz. W polu elektrycznym między elektrodami efekt jonizacji ulega wzmocnieniu, co skutkuje krótkotrwałym wyładowaniem elektrycznym i związanym z tym przepływem impulsu prądowego w obwodzie szeregowo połączonych: anody, katody, zasilacza i opornika R. Na tym ostatnim powstaje impuls napięciowy, który steruje pracą siatki lampy wzmacniacza napięciowego. W wzmacniaczu następuje zwiększenie amplitudy impulsu do wartości umożliwiającej jego detekcję przez układ licznika.

## STANOWISKO DO BADAŃ

Jednym z elementów zestawu ćwiczeniowego jest domek ochronny, którego konstrukcja w sposób schematyczny przedstawiona jest na Rys. 4. Zewnętrzne ściany domku są wykonane z materiałów silnie absorbujących promieniowanie.



Rys. 4. Schemat konstrukcji domku ochronnego.

W specjalnie przygotowanym otworze na szczycie domku zamocowany jest licznik G-M, który w obudowie posiada otwór o rozmiarze dostosowanym do okna licznika. W części bocznej domku znajduje się przesuwana śluzka zamykająca jego wnętrze. W wewnętrznej ścianie wycięte są specjalne rowki, ułatwiające umieszczanie płytek absorbentu. Na dnie domku w osłonie ołowiowej umieszczony jest preparat promieniotwórczy.

Z licznikiem G-M współpracuje standardowa aparatura elektroniczna składająca się z regulowanego zasilacza wysokiego napięcia (ZWN) i licznika impulsów (Rys. 3.). Licznik można ustawić do pracy w jednym z dwóch niezależnych trybów zliczania: stałej liczby  $N$  impulsów lub stałego czasu  $t$  zliczeń. Z wyborem pierwszego trybu wiąże się konieczność niezależnego

pomiaru czasu zliczeń, natomiast dla drugiego trybu stałą wartość czasu pomiaru ustawia się odpowiednimi przyciskami znajdującymi się na płycie czołowej licznika. Podczas wykonywania zliczeń na płycie czołowej licznika zapalona jest lampka kontrolna GATE. W każdym trybie pracy licznik po wykonaniu zadania w sposób automatyczny kończy zliczenia, gasząc kontrolkę GATE i wyświetlając liczbę dokonanych zliczeń.

## WYKONANIE POMIARÓW

Promieniowanie  $\gamma$  jest dalekosiężne i ma właściwości jonizujące, które w sposób silnie destrukcyjny oddziałuje na organizmy istot żywych, w tym człowieka. Dlatego podczas wykonywania ćwiczenia należy dochować wszelkich środków ostrożności, chroniąc przed nadmierną ekspozycją siebie i inne osoby znajdujące się w laboratorium. Dlatego domek ze źródłem promieniowania może być otwarty tylko w czasie zmiany w nim liczby płytek absorbentu.

- A) Ustawiana na zasilaczu ZWN wartość napięcia pracy licznika G-M wynosi 600 V.
- B) Przypadająca na czas  $t = 100$  s. suma zliczeń biegu własnego licznika i zliczeń pochodzących od promieniowania tła zawiera się w zakresie  $290 \leq N_t \leq 340$  zliczeń.
- C) Wyjęcie z domku źródła promieniowania lub oddzielenie od domku licznika G-M może zostać wykonane TYLKO przez Prowadzącego zajęcia.
  1. Jeżeli w domku znajdują się płytki absorbentu, usunąć je.
  2. Poprosić prowadzącego o podłączenie układu do sieci i ustawienie na zasilaczu wartości napięcia licznika G-M. Po włączeniu układu pierwszy pomiar można wykonać po ok. 5 minutach.

**Uwaga!** Bez osoby Prowadzącej zajęcia nie wolno wykonać czynności wyżej opisanych.

Zabronione jest również zmiana napięcia pracy licznika w trakcie wykonywania ćwiczenia.

- Sprawdzić (poprawić, gdy to wymaga) stan wciśniętych klawiszy na płycie czołowej licznika. Prawidłowy stan: MODE - „preset time”, MULTIPLIER – „1x”, SECONDS – „10<sup>2</sup>”. W tej konfiguracji wciśniętych klawiszy licznik będzie pracował w trybie stałego czasu zliczeń  $t = 100$  s.
- Rozpocząć pomiar zliczeń bez absorbentu wciskając klawisz „START”. Po zgaśnięciu lampki „GATE” w Tabeli Pomiarów zapisać odczytaną z wyświetlacza liczbę zliczeń  $N$ . Klawiszem „RESET” wyzerować wyświetlany wynik.
- Otworzyć domek i od strony źródła promieniowania i włożyć pierwszą płytkę absorbentu. Zamknąć domek i wykonać pomiar wg pkt. 4.
- Wykonać pomiary dokładając kolejne płytki. W Tabeli Pomiarów zapisywać wartości zliczeń  $N_x$  i liczbę płytek w domku.
- Po wykonaniu serii pomiarów płytki usunąć z domku. Wykonać drugą i trzecią serię pomiarów według pkt. 4-6.
- Pod Tabelą Pomiarów zapisać nazwę materiału absorbentu i wartość  $x$  średniej grubości jednej płytki wraz z jej całkowitą niepewnością  $u(x)$ .
- Po uzyskaniu podpisu Prowadzącego pod Tabelą pomiarów, pokrętkiem regulacji zasilacza ZWN obniżyć napięcie do minimum, następnie wyłączyć zasilanie licznika. Odłączyć przewody sieciowe.

TABELA POMIARÓW

LICZBA PŁYTEK ABSORBENTU $n$	N		
	$N_1$	$N_2$	$N_3$
	[zliczenia]	[zliczenia]	[zliczenia]
0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Materiał absorbentu: .....  $N_t = \dots\dots$  [zliczeń]      średnia grubość płytki,  $d = \dots\dots\dots$  [mm]  
 $u(d) = \dots\dots\dots$  [mm]

**OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW**

- Wykonać przykład obliczenia grubości  $d$  dla  $n > 4$  płytek absorbentu.

$$x = n \cdot d \tag{13}$$

- Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności  $u(x)$ :

$$u(x) = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial d} \cdot u(d)\right)^2} = n \cdot u(d) \tag{14}$$

- Wykonać przykład obliczenia średniej liczby zliczeń  $N$ :

$$N = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{3} \tag{15}$$

4. Odjąć  $N_t$  od otrzymanej w pkt. 3. średniej liczby zliczeń  $N$ :

$$N - N_t = \dots \dots \quad (16)$$

5. Wykonać przykład obliczenia natężenia promieniowania  $I$ :

$$I = \frac{N - N_t}{t} \quad \left[ \frac{\text{zliczeń}}{\text{s}} \right] \quad (17)$$

6. Wykonać przykład oszacowania wartości  $u(I)$ :

$$u(I) = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial N} \cdot u(N)\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial N_t} \cdot u(N_t)\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial t} \cdot u(t)\right)^2} \cong \sqrt{\left(\frac{1}{t} \cdot u(N)\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{N}}{t}\right)^2} = \frac{\sqrt{N}}{t} \left[ \frac{\text{zliczeń}}{\text{s}} \right] \quad (18)$$

W powyższym wyprowadzeniu uwzględniono, że w porównaniu do  $u(N)$  wnoszona przez  $u(N_t)$  poprawka wnosi niewiele znaczącą wartość do wyniku końcowego. Również w odniesieniu do  $u(t)$  postąpiono tak samo, z uwagi na znikomo małą wartość  $\frac{u(t)}{t} \sim 10^{-6}$  związaną z dużą dokładnością odmierzenia czasu przez taktowany kwarcem wewnętrzny zegar licznika. Przyjęto, że związana z liczbą zliczeń  $N$  standardowa niepewność  $u(N)$  wynosi  $u(N) = \sqrt{N}$ .

7. Wykonać przykład obliczenia wartości logarytmu naturalnego z natężenia promieniowania  $\ln(I)$ :

$$\ln(I) = \dots \dots \quad (19)$$

8. Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności  $u(\ln(I))$ :

$$u(\ln(I)) = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln(I)}{\partial I} \cdot u(I)\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{I} \cdot u(I)\right)^2} = \frac{u(I)}{I} \quad (20)$$

9. Wykonać pozostałe obliczenia a otrzymane wartości zapisać w tabeli wyników.

TABELA WYNIKÓW

$x$	$u(x)$	$N$	$u(N)$	$I$	$u(I)$	$\ln(I)$	$u(\ln(I))$
[mm]	[mm]	[zlicz.]	[zlicz.]	$\frac{\text{zlicz.}}{\text{s}}$	$\frac{\text{zlicz.}}{\text{s}}$	[-]	[-]

10. Wykonać wykres zależności natężenia promieniowania  $I$  od grubości absorbentu  $x$ .

11. Wykonać wykres zależności logarytmu z natężeń promieniowania  $\ln(I)$  od grubości absorbentu  $x$ . Między punktami wykresu poprowadzić prostą najlepszego dopasowania.

12. Z użyciem metody REGLINP (arkusz Excel) wyznaczyć liczbowe wartości nachylenia i odciętej równania prostej (21) oraz  $u(a)$ ,  $u(b)$  i  $R^2$ . Otrzymane wyniki zapisać w Tabeli Wyników:

$$\ln(I) = a \cdot x + b \quad (21)$$

TABELA WYNIKÓW

parametry równania prostej	nachylenie		odcięta		miara jakości dopasowania
	a	u(a)	b	u(b)	R <sup>2</sup>
	$\left[ \frac{1}{\text{mm}} \right]$	$\left[ \frac{1}{\text{mm}} \right]$	[-]	[-]	[-]
przed zaokrągleniem					
po zaokrągleniu					

13. Zgodnie z równaniem (12), z dokładnością do znaku, liniowy współczynnik pochłaniania  $\mu$  jest liczbowo równy współczynnikowi kierunkowemu prostej z pkt. 12:

$$\mu = -a \quad (22)$$

14. Oszacować wartość rozszerzonej ( $k = 2$ ) niepewności  $u(\mu)$ :

$$U(\mu) = k \cdot u(\mu) = k \cdot u(a) \quad (23)$$

15. Korzystając z wyniku otrzymanego w pkt. 13 i na podstawie odpowiedniej dla materiału absorbentu krzywej widocznej na Rys. 2. oszacować wartość energii kwantów promieniowania  $\gamma$  emitowanych przez użyte w ćwiczeniu radioaktywne źródło.

16. Obliczyć wartość grubości połowkowego osłabiania  $x_{1/2}$  i oszacować jej niepewności rozszerzonej ( $k = 2$ )  $U(x_{1/2})$ :

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (24)$$

$$U(x_{1/2}) = k \cdot u(x_{1/2}) = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial x_{1/2}}{\partial \mu} \cdot u(\mu)\right)^2} = k \cdot \sqrt{\left(-\frac{\ln 2}{\mu^2} \cdot u(\mu)\right)^2} = k \cdot x_{1/2} \cdot \frac{u(\mu)}{\mu} \quad (25)$$

17. Obliczyć wartość masowego współczynnika pochłaniania  $\mu_m$  i oszacować jego niepewność rozszerzoną ( $k = 2$ )  $U(\mu_m)$ :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (26)$$

$$U(\mu_m) = k \cdot u(\mu_m) = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \mu_m}{\partial \mu} \cdot u(\mu)\right)^2} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\rho} \cdot u(\mu)\right)^2} = k \cdot \mu_m \cdot \frac{u(\mu)}{\mu} \quad (27)$$

*Wykorzystać wartość gęstości masy  $\rho$  materiału absorbentu znajdującą się w Tablicach Fizycznych.*

18. Dokonać oceny zgodności otrzymanych wykresów z przewidywaniami teoretycznymi. Zestawić wyniki końcowe w formie tabelarycznej.

## LITERATURA

- [1] BOBROWSKI Cz.: Fizyka – Krótki Kurs, WNT, Warszawa 1995.
- [2] SZYDŁOWSKI H: Pracownia fizyczna wspomaganą komputerem, PWN, Warszawa 1994.
- [3] Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki (praca zbiorowa), Skrypt Nr 279, Politechnika Opolska 2007.