



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
8	Pomiar okresu połowicznego zaniku izotopu promieniotwórczego
Data pomiaru:	
Imię i nazwisko:	
Imię i nazwisko:	

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest potwierdzenie prawa opisującego rozpad izotopu promieniotwórczego i identyfikacja badanego izotopu.

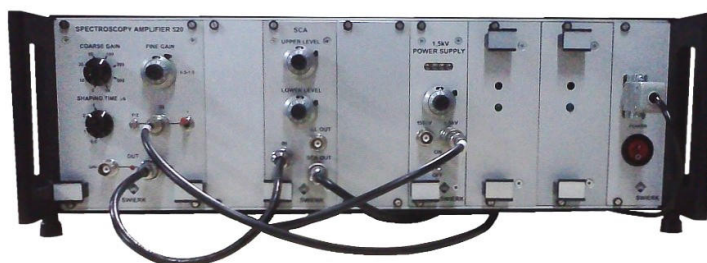
2. UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Zestaw doświadczalny, którego schemat przedstawia rys. 2, składa się z badanego źródła promieniotwórczego umieszczonego w ołowianym domku osłonowym, w którym znajduje się również sonda scyntylacyjna (domek i sonda nie są umieszczone na zdjęciu). Jest ona detektorem promieniowania jonizującego, w którym następuje przetworzenie kwantów γ w impulsy elektryczne.

Za zasilanie detektora odpowiada moduł zasilacza wysokiego napięcia w zestawie zasilająco-wzmacniającym (rys. 1). Wbudowany w ten zestaw wzmacniacz spektrometryczny zwiększa amplitudę impulsów z sondy, a połączony z nim analizator amplitudy przepuszcza jedynie te, których amplituda mieści się w zadanym przedziale.

Częścią układu pomiarowego jest komputerowy przelicznik impulsów pokazujący liczbę kwantów promieniowania γ zarejestrowanych przez sondę scyntylacyjną w zadanym odcinku czasu.

Równocześnie do wyjścia wzmacniacza impulsów przyłączony jest drugi układ pomiarowy w postaci automatycznie działającego komputerowego analizatora impulsów. Na jego ekranie obrazowane będzie widmo energii fotonów γ emitowanych w rozpadzie badanego źródła.

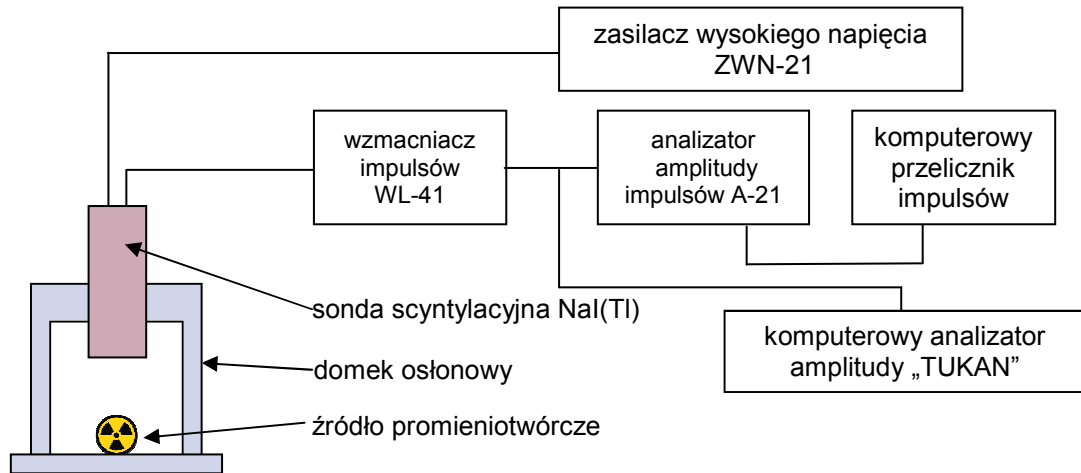


Rys. 1. Układ zasilający i wzmacniający

3. WSTĘP TEORETYCZNY

Przez rozpad promieniotwórczy rozumiemy spontaniczną, samorzutną emisję energii z jąder atomowych. Energia może być emitowana w postaci cząstek materii lub fotonów (kwantów) promieniowania elektromagnetycznego. Opisując rozpad promieniotwórczy podajemy:

- nazwę i liczbę masową izotopu promieniotwórczego, np. ^{235}U , ^{241}Am , ^{14}C ,
- rodzaj oraz energię emitowanych cząstek α , β , γ , inne...,
- parametr $T_{1/2}$, określający szybkość przemiany (definicja niżej).



Rys. 2. Schemat blokowy aparatury pomiarowej

Liczba jąder atomowych, ulegających przemianie w jednostce czasu, jest proporcjonalna do liczby atomów izotopu w badanej próbce:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \quad (1)$$

gdzie ułamek $\Delta N/\Delta t$, „aktywność izotopu” (jednostką aktywności jest bekerel, 1 Bq = 1 rozpad/1 s), oznacza liczbę przemian ΔN w czasie Δt ; stała proporcjonalności λ nazywana jest „stałą rozpadu”.

Wprowadzając pojęcie pochodnej dN/dt zamiast skończonych przyrostów ΔN oraz Δt otrzymujemy równanie różniczkowe, którego rozwiązaniem jest funkcja wykładnicza:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

gdzie $N(t)$ to liczba jąder nuklidu w chwili t . Dla $t = 0$, czyli na początku naszej obserwacji, liczba jąder wynosi N_0 .

Bardzo użytecznym parametrem, opisującym przebieg czasowy procesu rozpadu promieniotwórczego jest *okres połowicznego zaniku*, oznaczany symbolem $T_{1/2}$. Jest to czas, w którym ulega rozpadowi połowa początkowej liczby nuklidów. Policzmy:

$$N(x) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda x} \quad (3)$$

czyli, po logarytmowaniu obu stron:

$$\ln N_0 - \ln 2 = \ln N_0 - \lambda x \quad (4)$$

x w tym równaniu to szukany okres połowicznego zaniku, $T_{1/2}$:

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2 \quad (5)$$

albo:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (6)$$

Stała rozpadu, λ , jest więc odwrotnie proporcjonalna do $T_{1/2}$:

- mały czas $T_{1/2}$ oznacza dużą aktywność właściwą danego izotopu,
- duży czas $T_{1/2}$ oznacza małą aktywność właściwą danego izotopu.

Aktywność:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N(t) = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_0 e^{-\lambda t} \quad (7)$$

W naszym zadaniu miarą zmiany aktywności badanego izotopu jest zmiana liczby fotonów gamma, N , rejestrowanych przez sondę scyntylacyjną w ustalonym czasie.



ZASADA DZIAŁANIA SONDY SCYNTYLACYJNEJ

Przejściu promieniowania jonizującego przez niektóre substancje towarzyszą błyski światła, zwanych scyntylacjami.

Typową sondę scyntylacyjną tworzą scyntylator oraz fotopowielacz.

Fotony padające na katodę fotopowielacza powodują emisję elektronów, których liczba jest następnie powielana przez układ kilkunastu elektrod, zwanych *dynodami* - elektrony przyspieszane przez pole elektryczne pomiędzy każdą parą elektrod wybijają z ich powierzchni następne elektrony (typowa różnica potencjałów pomiędzy parą dynod wynosi 100-150 V). Narastający strumień elektronów tworzy impuls elektryczny, który jest rejestrowany przez odpowiednie urządzenie.

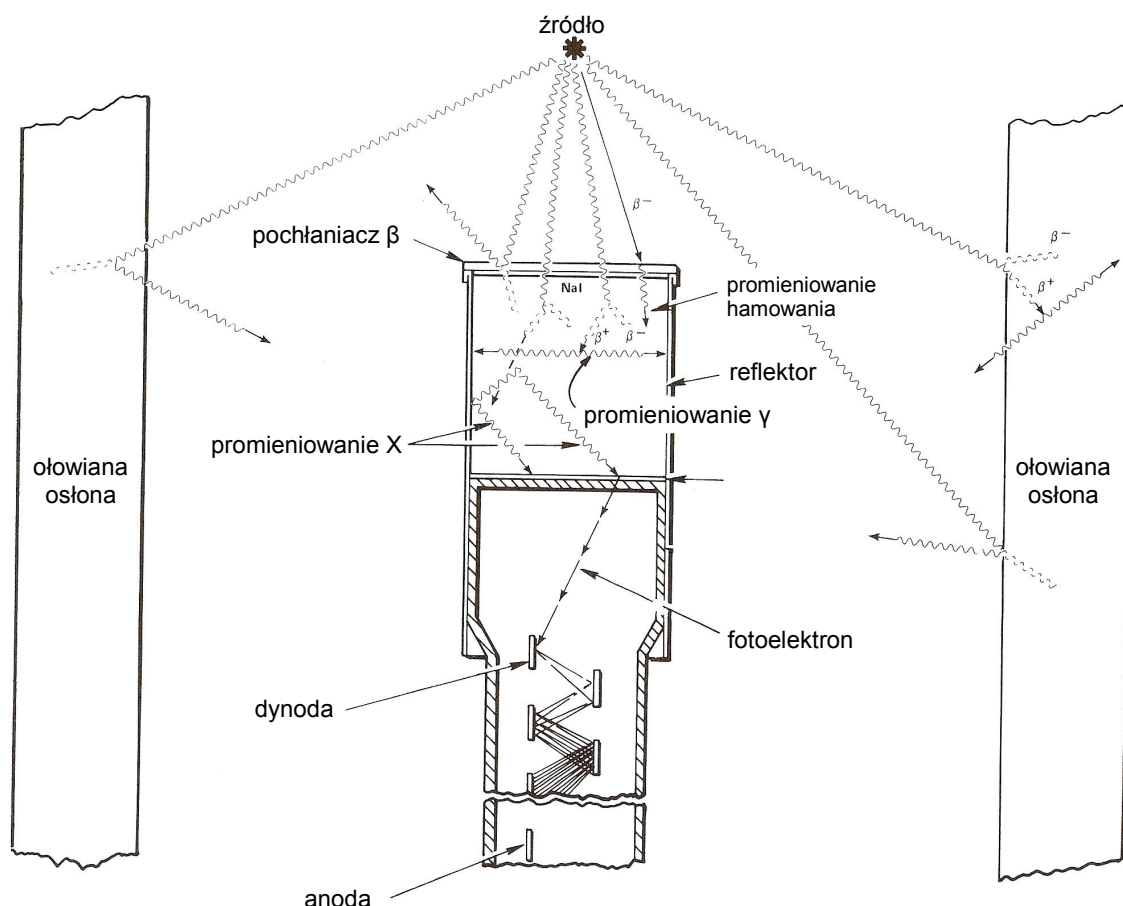
Współczynnik powielenia liczby elektronów jest rzędu 10^6 i zależy od całkowitego napięcia przyłożonego do fotopowielacza oraz liczby dynod. Niekiedy celem polepszenia warunków zbierania światła ścianki scyntylatora pokryte są warstwą odbijającą, a odpowiedni światłowód doprowadza światło do fotopowielacza.

O jakości sondy scyntylacyjnej decydują:

- wydajność przetwarzania energii przechodzącego przez scyntylator promieniowania jonizującego na energię świetlną – może ona zostać zwiększona przez tzw. *domieszkowanie*, czyli dodanie innego materiału. Najczęściej stosowany scyntylator, jodek sodu, NaI, zawiera dodatek $\sim 0,2\%$ talu, Tl;
- przezroczystość i odpowiednio duży współczynnik załamania materiału scyntylatora - dla NaI(Tl) współczynnik załamania $n = 1,775$;
- czas zaniku świecenia.

Do rejestracji przechodzenia promieniowania gamma dobieramy materiał scyntylatora o odpowiednio dużej gęstości i dużej średniej liczbie atomowej Z .

Parametry typowego scyntylatora NaI(Tl): gęstość $d = 3,67 \text{ g/cm}^3$, średnie $Z \approx 32$, możemy oczekiwać ok. 40 000 fotonów na 1 MeV pochłoniętej energii.



4. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

UWAGA: wszelkie operacje ze źródłami promieniowania przeprowadza obsługa laboratorium!

A) Przed włączeniem zasilania należy sprawdzić i ewentualnie skorygować ustawienie elementów regulacyjnych w aparaturze elektronicznej:

- zasilacz wysokiego napięcia:
 - napięcie $U_L = 0$ V (co odpowiada ustawieniu potencjometru wieloobrotowego na 0),
 - przełącznik w pozycji „off”;
- wzmacniacz impulsów:
 - wzmocnienie „FINE GAIN”: ☐¹,
 - wzmocnienie „COARSE GAIN”: ☐,
 - kształtowanie impulsów „SHAPING TIME”: ☐ μ s;
- analizator amplitudy:
 - potencjometr „LOWER LEVEL” w pozycji ☐ V,
 - potencjometr „UPPER LEVEL” w pozycji ☐ V.

B) Włączyć zasilanie aparatury. W tym celu należy:

- włączyć zasilanie zestawu przyciskiem po prawej stronie,
- w module zasilacza wysokiego napięcia zmienić położenie przełącznika „off” na pozycję „on” i powoli kręcąc potencjometrem ustawić napięcie zasilania sondy na ☐ V,
- UWAGA: włączenie komputerowego analizatora impulsów zostanie wykonane przez osobę nadzorującą ćwiczenia.

C) Włączyć komputer i uruchomić program „counter”. Zaznaczyć opcje „zerowanie przed startem” oraz „czas zliczania”. Wcisnąć przycisk „ZMIEN” i ustawić czas pomiaru na ☐ s.

D) Wykonać pomiar liczby impulsów biegu własnego („tła”) układu pomiarowego. W tym celu, po upewnieniu się, że domek osłonowy jest zamknięty, nacisnąć w programie przelicznika przycisk „START”. Wynik z przelicznika należy zapisać w tabeli 1 jako N_{01} . Wykonać kolejne pomiary N_{02} , N_{03} , N_{04} , N_{05} . Policzyc średnią wartość $\bar{N}_0$ biegu własnego.

 E) Po wykonaniu powyższych pomiarów do domku osłonowego zostanie włożone badane źródło promieniowania i domek zostanie zamknięty.

F) W odstępach dokładnie 1-minutowych wykonujemy pomiar liczby impulsów, notując w tabeli 2 godziny i minuty rozpoczęcia każdego pomiaru. Należy wykonać serię nie mniej niż 55 pomiarów. Jeśli przerwa pomiędzy pomiarami jest większa niż 1 minuta, należy zaznaczyć to w tabeli.

 G) Po zakończeniu serii pomiarów aktywności badanego izotopu usunąć próbkę, ponownie zmierzyć bieg własny (tło pomiarowe) i porównać z poprzednio uzyskanym wynikiem. Jest to niezbędne dla prawidłowego wyznaczenia okresu połowicznego zaniku.

5. WYZNACZENIE INTENSYWNOŚCI PROMIENIOWANIA GAMMA

A) Po zakończeniu pomiarów uzupełnić tabelkę pomiarową o niezbędne obliczenia.

B) Wykonać wykres zależności $N - \bar{N}_0 = f(t)$ w skali logarytmiczno-liniowej (skala logarytmiczna dla liczby zliczeń, skala liniowa dla czasu). Wykres w tej skali powinien mieć przebieg liniowy. Dla każdego z punktów nanieść zakres niepewności pomiarowych określonych jako pierwiastek kwadratowy z liczby impulsów.

C) Wyznaczyć czas połowicznego zaniku badanego izotopu promieniotwórczego.

¹ szczegółowe ustawienia aparatury podane zostaną w trakcie wykonywania ćwiczenia



METODA NAJMNIEJSZYCH KWADRATÓW

Statystyczna metoda najmniejszych kwadratów pozwala obliczyć parametry a i b prostej:

$$y = ax + b$$

Jeżeli niepewnością pomiarową obciążone są wartości tylko jednej zmiennej (x lub y) i niepewności są równe dla wszystkich punktów pomiarowych, wtedy obliczenia dokonujemy według poniższych wzorów:

$$\bar{a} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$\bar{b} = \frac{\sum y_i - \bar{a} \sum x_i}{n}$$

gdzie n - liczba pomiarów, wszystkie sumy liczone są w granicach od $i = 1$ do $i = n$.

Niepewności wyznaczenia współczynników a i b dane są zależnościami:

$$S_a = \sqrt{\frac{n S_y}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

$$S_b = S_a \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}}$$

gdzie:

$$S_y = \frac{1}{n-2} \sum (y_i - ax_i - b)^2$$

Można to zrobić graficznie na podstawie wykresu dopasowując prostą do punktów pomiarowych, a następnie na tej prostej wybierając dwa punkty, z których jeden odpowiada liczbie impulsów dwukrotnie większej niż drugi. Nie muszą to być (a nawet nie powinny) rzeczywiste punkty pomiarowe. Odległość pomiędzy tymi punktami mierzona na osi czasu jest poszukiwanym czasem połowicznego zaniku. Maksymalną niepewność tego pomiaru można w przybliżeniu oszacować jako różnicę pomiędzy czasami połowicznego zaniku dla różnych możliwych do przeprowadzenia prostych, które mieszczą się w zakresie niepewności pomiarowych. Narysować kilka takich bardziej odchylonych od wyników prostych i oszacować niepewność wyznaczenia tego czasu.

Drugą metodą jest matematyczne przekształcenie zmiennych, np.:

$$y = \ln(N - N_0), \quad x = t$$

a następnie dopasowanie prostej $y = ax + b$ metodą najmniejszych kwadratów (patrz ramka). Wyznaczone współczynniki a i b oznaczają:

$$a = -\lambda, \quad b = \ln N(t=0)$$

gdzie λ to stała rozpadu, z której możemy wyznaczyć $T_{1/2}$, zaś $N(t=0)$ to aktywność źródła w umownej chwili zerowej odpowiadającej początkowi pomiarów w ćwiczeniu.

D) Odnaleźć w *Tablicach Izotopów* pierwiastek, którego izotop był mierzony i na podstawie wyznaczonego czasu $T_{1/2}$ określić liczbę masową A izotopu. Po uzgodnieniu uzyskanych wyników z osobą nadzorującą ćwiczenie wpisać obliczony czas połowicznego zaniku oraz prawdopodobną identyfikację izotopu do tabeli pomiarowej.

6. POMIAR ENERGII FOTONÓW W BADANYM WIDMIE

Aby potwierdzić prawidłową identyfikację izotopu, opartą na pomiarze okresu połowicznego zaniku, układ pomiarowy został wzbogacony o skomputeryzowany analizator amplitudy TUKAN-8K. Na ekranie komputera, równolegle z pomiarami okresu połowicznego zaniku, będzie wizualizowane widmo fotonów γ emitowanych przez badane źródło. Po zakończeniu pomiarów okresu połowicznego zaniku należy (z pomocą prowadzącego ćwiczenie):

A) Zlokalizować i zapisać współrzędne wszystkich maksimów (pików) na ekranie.

B) Wykonać kalibrację energetyczną układu, tj. wyznaczyć relację pomiędzy numerem kanału analizatora a odpowiadającą mu energią fotonu. W tym celu należy:



- usunąć badane źródło promieniowania z domku osłonowego i umieścić je w przeznaczonym dla niego pojemniku,



- kolejno umieszczać w domku pomiarowym źródła kalibracyjne o znanych energiach fotonów γ ,
- dla każdego z tych źródeł wykonać pomiar widma energetycznego z pomocą analizatora, aby określić numery kanału odpowiadające maksimom. Po wykonaniu pomiarów źródeł kalibracyjnych, włączyć pomiar tzw. „biegu własnego”. Po zakończeniu pomiaru określić położenia maksimów na ekranie i z prostej kalibracyjnej wyznaczyć odpowiadające im energie fotonów γ .

7. OPRACOWANIE POMIARÓW ENERGII

A) Wykonać wykres zależności energii fotonu od numeru kanału (jest to tzw. prosta kalibracja energetyczna układu pomiarowego).

B) Na ww. wykresie zaznaczyć numery kanałów odpowiadających maksimum badanego, nieznanego źródła promieniotwórczego i korzystając z prostej kalibracji wyznaczyć energie fotonów emitowanych przez to źródło.

C) Porównać wyniki z danymi zamieszczonymi w *Tablicy Izotopów*.



ŚRODOWISKOWE PROMIENIOWANIE GAMMA

W przyrodzie występuje promieniowanie γ pochodzące od radioaktywnych izotopów różnych naturalnie występujących pierwiastków. Są również niewielkie (choć dające się zmierzyć, a zatem będące częścią tzw. promieniowania tła) ilości pierwiastków pochodzenia sztucznego.

Naturalne izotopy to przede wszystkim potas ^{40}K , tor ^{232}Th oraz izotopy uranu, ale także inne izotopy z szeregów uranowych i torowego (tzn. powstające z uranu i toru w wyniku promieniotwórczych rozpadów α i β).

Z izotopów sztucznych w promieniowaniu tła widoczny jest głównie cez ^{137}Cs . Izotop ten pojawił się w środowisku po wybuchach testowych broni jądrowej w latach 60-tych XX wieku i po pożarze elektrowni w Czarnobylu w kwietniu 1986r.

Poniższa tabela zawiera linie widmowe, jakie można znaleźć w próbkach środowiskowych:

Energia fotonu γ [keV]	Izotop	Prawdopodobieństwo emisji fotonu γ na rozpad lub ułamek dla stanu równowagi szeregu	Uwagi
46,54	^{210}Pb	4,2 %	
143,76	^{235}U	10,9 %	
185,72	^{235}U	57,2 %	
186,21	^{226}Ra	3,5 %	
238,63	^{212}Pb	43,5 %	szereg torowy (Th)
241,98	^{214}Pb	7,1 %	
295,21	^{214}Pb	18,2 %	
351,93	^{214}Pb	35,1 %	
583,19	^{208}Tl	30,5 %	szereg torowy (Th)
609,32	^{214}Bi	44,6 %	
661,66	^{137}Cs	85,2 %	
1120,29	^{214}Bi	14,7 %	
1460,83	^{40}K	10,67 %	
1764,52	^{214}Bi	15,1 %	
2614,53	^{208}Tl	35,9 %	szereg torowy (Th)



Przykładowy sposób graficznego opracowania wyników. Dwa punkty (oznaczone A i B) obrane na dopasowanej do danych linii prostej (oznaczonej kolorem czarnym) wyznaczają chwile, pomiędzy którymi liczba zliczeń maleje dwukrotnie ($N_A / N_B = 2$). Czas od chwili t_A do t_B jest zatem czasem połowicznego rozpadu ($T_{1/2} = t_B - t_A$). Proste równoległe do dopasowanej narysowane linią przerywaną to granice przedziału, w którym mieści się ok. 2/3 pomiarów. Ponad i pod tym przedziałem znajduje się po ok. 1/6 pomiarów. Proste oznaczone kolorami **czzerwonym** i **zielonym** to dwa maksymalnie skrajne ułożenia prostej dopasowania, które nadal mieszczą się w tym przedziale. Sprawdzenie położenia punktów A i B na tych właśnie prostych daje wartości $T_{1/2}$ odpowiednio **zanizoną** i **zawyżoną**. Tak obliczone wartości wyznaczają zakres statystycznych niepewności pomiarowych czasu półrozpadu.

ĆWICZENIE <b style="font-size: 1.5em;">8	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ Pomiar okresu połowicznego zaniku izotopu promieniotwórczego
Data pomiaru:..... Imię i nazwisko:..... Imię i nazwisko:..... Szkoła, klasa:.....	

Wyniki pomiarów:

Obliczony na podstawie wykresu $N=f(t)$ czas połowicznego zaniku dla badanego źródła wynosi:

$$T_{1/2} = \dots\dots\dots$$

Położenia maksimum fotopików widma energetycznego badanego izotopu:

Lp.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Położenie maksimum fotopiku						
Zmierzona energia [keV]						
Energia odczytana z tablic [keV]						

Kalibracja energetyczna:

Izotop	Energia [keV]	Numer kanału	Izotop	Energia [keV]	Numer kanału
^{226}Ra	75		^{137}Cs	662	
	186				
	242		^{60}Co	1173	
	295				
	352			1332	
	609				

TABELA 1

Lp.	Liczba zliczeń biegu własnego N_{oi}	Kwadrat odchylenia N_{oi} od wartości średniej $\bar{N}_0$	Odchylenie standardowe N_{oi} $\sigma N_{oi} = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum (N_{oi} - \bar{N}_0)^2}$
1.			Odchylenie standardowe $\bar{N}_0$ $\sigma \bar{N}_0 = \sqrt{\frac{1}{5 \cdot (5-1)} \sum (N_{oi} - \bar{N}_0)^2}$
2.			
3.			
4.			
5.			
Wartość średnia $\bar{N}_0 =$		$\sum (N_{oi} - \bar{N}_0)^2 =$	

TABELA 2

Lp.	Godzina rozpoczęcia pomiaru (hh:mm:ss)	N	$N - \bar{N}_0$
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			
11.			
12.			
13.			
14.			
15.			
16.			
17.			
18.			
19.			
20.			
21.			
22.			
23.			
24.			
25.			
26.			
27.			
28.			
29.			
30.			
31.			
32.			
33.			
34.			
35.			

TABELA 2 c.d.

Lp.	Godzina rozpoczęcia pomiaru (hh:mm:ss)	N	$N - \bar{N}_0$
36.			
37.			
38.			
39.			
40.			
41.			
42.			
43.			
44.			
45.			
46.			
47.			
48.			
49.			
50.			
51.			
52.			
53.			
54.			
55.			
56.			
57.			
58.			
59.			
60.			
61.			
62.			
63.			
64.			
65.			
66.			
67.			
68.			
69.			
70.			