

Pomiar Zawartości Radonu w Powietrzu

Kacper Kłos

7 kwietnia 2025

W niniejszym raporcie wyznaczyliśmy zawartość radonu na podstawie produktów jego rozpadu oraz zbadaliśmy zależność promieniowania od odległości. Najpierw umieszczaliśmy próbkę toru nad scyntylatorem i rejestrowaliśmy jego odczyty podczas 2-minutowych interwałów, po czym zwiększaliśmy dystans między próbką a detektorem. Na podstawie dopasowania danych w skali log-log uzyskaliśmy, że liczba zarejestrowanych cząstek jest proporcjonalna do odwrotności odległości: $N \propto 1/r$.

Następnie wykorzystaliśmy metodę Markova, służącą do wyznaczania zawartości polonu w powietrzu, który powstaje w wyniku rozpadu radonu. Pomiar polegał na serii cykli pompowania powietrza przez filtr (ze zliczaniem objętości przepływającego gazu), a następnie dwóch pomiarach promieniowania rejestrowanego z tego filtra. Uzyskane wyniki wskazują, że koncentracja radonu w powietrzu: $(25 \pm 11) \text{ Bq m}^{-3}$ występuje nad stertą skał, $(9 \pm 6) \text{ Bq m}^{-3}$ w korytarzu przylegającym do pomieszczenia, w którym prowadzono pomiary, oraz $(10 \pm 9) \text{ Bq m}^{-3}$ w próbkach świeżego powietrza z zewnątrz.

1 Wstęp

W niniejszym raporcie przedstawiamy zbadamy zawartości radonu w powietrzu pochodzącym z różnych otoczeń. Dodatkowo analizujemy, jak zmienia się zarejestrowane promieniowanie w funkcji odległości źródła od detektora cząstek.

2 Podstawy Teoretyczne

W naszych rozważaniach korzystamy głównie z prawa rozpadu promieniotwórczego, zgodnie z którym liczba jąder izotopu (np. radonu lub produktów jego rozpadu) maleje w czasie w tempie proporcjonalnym do bieżącej liczby jąder:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t),$$

gdzie λ jest dodatnią stałą rozpadu zależną od danego izotopu. Rozwiązaniem tego równania jest:

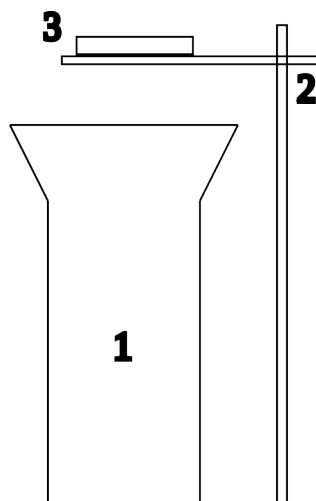
$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

3 Układ Doświadczalny

Zarówno do pomiarów zależności natężenia promieniowania od odległości, jak i do określania zawartości radonu w powietrzu, wykorzystaliśmy ten sam detektor cząstek (jego dokładniejszy opis można znaleźć w [1]), który liczy rozpad w danym przedziale czasowym.

3.1 Pomiar zależności od odległości

Schemat układu przedstawiono na rys. 1. Próbkę promieniotwórczego toru umieszczano na regulowanym stojaku nad detektorem, a następnie zmieniano odległość między próbką a detektorem i mierzono liczbę zarejestrowanych rozpadów w ustalonym czasie (2 minuty).



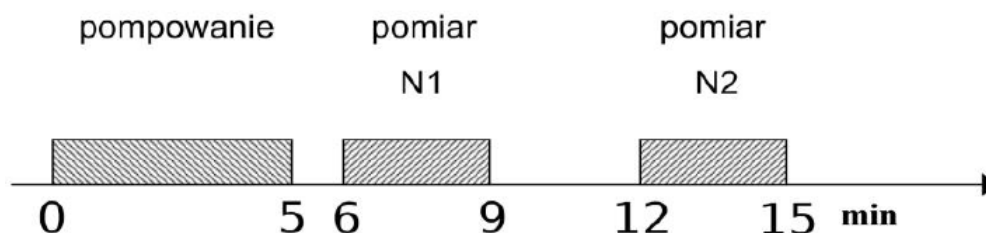
Rysunek 1: Układ pomiarowy do badania zależności promieniowania od odległości: 1 – miernik promieniowania, 2 – stojak z miarką, 3 – źródło promieniotwórcze.

3.2 Pomiar zawartości radonu w powietrzu (metoda Markova)

Do określania ilości polonu-218 (pochodnej radonu-222) w badanym powietrzu zastosowaliśmy metodę Markova [2]. Mierzone powietrze było przepompowywane przez filtr (na którym osadzały się produkty rozpadu), a później wykonywano dwa pomiary aktywności filtra w ściśle określonych odstępach czasowych. Schemat cyklu to:

- 5 minut – pompowanie powietrza przez filtr,
- 1 minuta – przerwa,
- 3 minuty – pierwszy pomiar aktywności filtra,
- 3 minuty – przerwa,
- 3 minuty – drugi pomiar aktywności filtra.

Graficzne przedstawienie cyklu widnieje na rys. 2. Podczas pompowania monitorowano całkowitą objętość powietrza ν za pomocą gazomierza, a pomiary promieniowania przeprowadzano detektorem umieszczonym w pobliżu filtra.



Rysunek 2: Schemat cyklu pomiarowego (źródło: [1]).

Poprzez prostą analizę z użyciem wzoru (1) otrzymana koncentracja polonu (co za tym idzie radonu) w powietrzu C_A wyraża się w postaci:

$$C_A = \frac{7,3 \times 10^{-5} (N_1 - N_2)}{\epsilon \nu \eta},$$

gdzie N_1 i N_2 są zarejestrowanymi rozpadami w pierwszym i drugim okresie pomiarowym, ν to objętość powietrza przepompowanego przez filtr w danym czasie, ϵ oznacza wydajność rejestracji cząstek przez detektor, a $\eta \approx 1$ jest efektywnością zatrzymywania produktów rozpadu na filtrze.

W naszej analizie przyjęliśmy $\eta = 1$ oraz $\epsilon \approx 0,0875$. Kulcowe założenia jakie poczyniliśmy to że promieniowanie roznosi się po sferze zatem tylko 50% kieruje się w stronę detektora, przy czym tylko 45% dociera do detektora w którym zostaje wykrytych tylko 35% cząstek. Nasze oszacowanie opieramy na publikacjach [3, 4]. Końcowo używamy uproszczonego wzoru:

$$C_A = \frac{83,43 \times 10^{-5} (N_1 - N_2)}{\nu}. \quad (2)$$

4 Wyniki Pomiarów

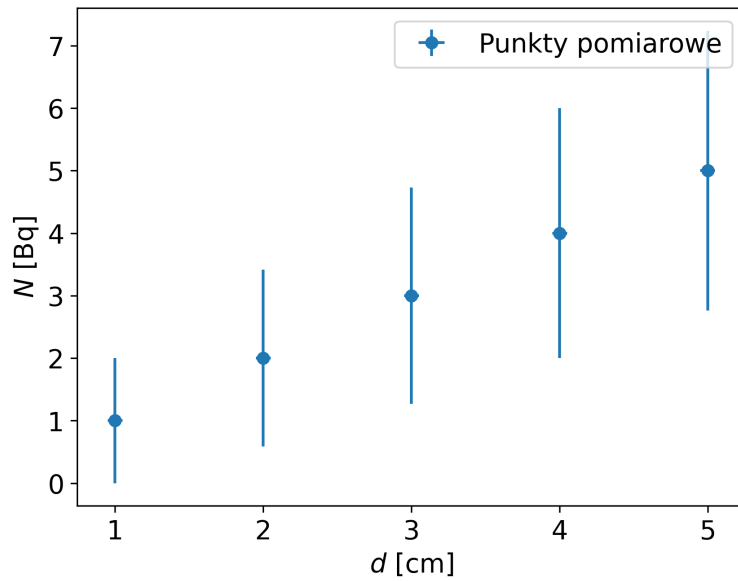
4.1 Zależność promieniowania od odległości

W pierwszej serii umieściliśmy próbkę toru nad detektorem (rys. 1) i mierzyliśmy liczbę zarejestrowanych rozpadów (w ciągu 120 s) przy różnych odległościach d . Wyniki przedstawia tab. 1.

Nr	N [Bq]	d [cm]
1	36	1
2	22	2
3	12	3
4	10	4
5	6	5

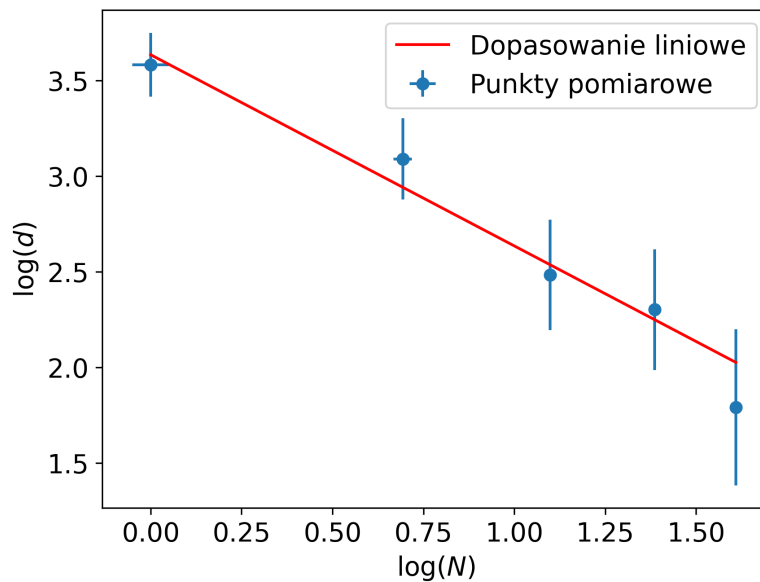
Tablica 1: Pomiar natężenia promieniowania N (liczba zliczeń w 120 s) w funkcji odległości d próbki od detektora.

Niepewność statystyczną zarejestrowanej liczby rozpadów szacujemy jako $u(N) = \sqrt{N}$, a błąd odległości ustalamy na połowę podziałki $\delta d = 0,05$ cm. Zależność $N(d)$ pokazuje rys. 3.



Rysunek 3: Zależność zarejestrowanych rozpadów N od odległości d .

Aby zbadać typową formę prawa potęgowego, przedstawiamy dane w skali log-log (rys. 4) i dopasowujemy prostą: $\log(N) = a \log(d) + b$.



Rysunek 4: Wykres zależności $\log(N)$ od $\log(d)$.

Dopasowanie dało:

$$a = -1,0 \pm 0,1, \quad b = 3,6 \pm 0,1,$$

co odpowiada zależności $N \propto 1/d$. Warto jednak zaznaczyć, że w idealnym przypadku cząstki powinny rozchodzić się sferycznie ($1/r^2$) i maleć wykładniczo z powodu interakcji

z powietrzem ($\exp(-r)$). Otrzymany wynik powinien być kombinacją tych przypadków, jednak uwzględniając duże błędy pomiarowe trudno jest dokładnie oszacować zależność.

4.2 Koncentracja radonu (metoda Markova)

Kolejno wykonaliśmy cykl opisany na rys. 2 w trzech różnych miejscach:

1. nad stertą kamieni (starsze próbki skalne),
2. w korytarzu tuż przed pomieszczeniem,
3. na zewnątrz (powietrze czerpane przez okno).

W tab. 2 zestawiono: N_1 , N_2 – rozpad w dwóch pomiarach po cyklu pompowania powietrza, a także objętości powietrza przed i po pomiarze (V_{przed} , V_{po}). Przyjmujemy błąd $\sqrt{N_i}$ dla zarejestrowanych rozpadów, $\delta V = 0,01 \text{ m}^3$ dla objętości oraz $\delta t = 1 \text{ s}$. Błąd na objętość (δV) oraz czas (δt) są znacznie poniżej 1%, dlatego pozwalamy sobie go zignorować w dalszej części, skupiając się na błędzie pochodzącym ilości zarejestrowanych rozpadów.

Środowisko	N_1	N_2	$V_{\text{przed}} [\text{m}^3]$	$V_{\text{po}} [\text{m}^3]$
Kamienie	132	95	2479,45	2483,13
Korytarz	49	35	2483,13	2486,95
Podwórze	91	76	2486,95	2490,87

Tablica 2: Rozpady w pierwszym (N_1) i drugim (N_2) okresie pomiarowym oraz objętość powietrza przed i po pompowaniu (metoda Markova).

Całkowita objętość przepompowanego powietrza ν stanowi różnicę $\nu = \frac{V_{\text{po}} - V_{\text{przed}}}{300 \text{ s}}$. Przy założeniach opisanych w 2 obliczamy koncentrację radonu C_A .

Błąd $u(C_A)$ wynika głównie z niepewności $\sqrt{N_1 + N_2}$, co prowadzi do:

$$u(C_A) = \frac{83,43 \times 10^{-5} \sqrt{N_1 + N_2}}{\nu}.$$

Wyniki podsumowano w tab. 3.

Środowisko	$C_A [\text{Bq m}^{-3}]$	$u(C_A) [\text{Bq m}^{-3}]$
Kamienie	25	11
Korytarz	9	6
Podwórze	10	9

Tablica 3: Wyniki wyznaczonego stężenia radonu w powietrzu metodą Markova, wraz z niepewnościami.

5 Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań wyznaczyliśmy zależność liczby zarejestrowanych rozpadów od odległości próbki toru od detektora. Analiza w skali log–log zasugerowała zależność zbliżoną do $1/d$, co odbiega od oczekiwanego wyniku. Jest to spowodowane ogromnymi niepewnościami w pomiarze rozpadów.

Następnie, stosując metodę Markova, oszacowaliśmy koncentrację radonu-222 (poprzez pomiar polonu-218) w powietrzu:

$$C_{A,\text{kamienie}} = (25 \pm 11) \text{ Bq m}^{-3}, \quad C_{A,\text{korytarz}} = (9 \pm 6) \text{ Bq m}^{-3}, \quad C_{A,\text{podwórze}} = (10 \pm 9) \text{ Bq m}^{-3}.$$

Otrzymane wartości wskazują nieznacznie podwyższoną zawartość radonu przy sterzie kamieni w porównaniu z korytarzem i otoczeniem zewnętrznym, co może być związane z większą obecnością minerałów zawierających tor czy uran.

Z literatury [5] wiadomo, że stężenia radonu w warunkach naturalnych mogą się znacznie różnić w zależności od geologii i wentylacji pomieszczeń. Nasze wyniki, choć obarczone znacznymi błędami (m.in. ze względu na ograniczoną wydajność detektora i przybliżenia co do zatrzymywania cząstek na filtrze), pokazują jednak pewną różnicę między miejscami z potencjalnie wyższym uwalnianiem radonu (skały) a miejscami mniej nim zanieczyszczonymi.

Literatura

- [1] *Pomiar Zawartości Radonu w Powietrzu*, Uniwersytet Warszawski.
- [2] K.P. Markov, N.W. Rijabov, K.N. Stas, *Atomnaja Energia* 12.
- [3] <https://scintacor.com/wp-content/uploads/2021/09/Comparisons-of-new-simple-methods-in-fabricating-ZnS-Ag-scintillations-for-detecting.pdf>, *Comparison of New Simple Methods in Fabricating ZnS(Ag) Scintillators for Detecting Alpha Particles*, S. K. Lee, S. Y. Kang, D. Y. Jang et al.
- [4] <https://www.rad-proceedings.org/papers/RadProc.2018.25.pdf>, M. Y. A. Mostafa, M. V. Zhukovsky, *Alpha Self-Absorption Evaluation in Radiometric Filter Material for the Natural Range of Alpha Energy (5–9 MeV)*.
- [5] L. Dobrzyński i E. Droste, *Promieniotwórczość a życie: problem ryzyka związanego z promieniowaniem jonizującym*, Raport Nr 12, Dział Szkolenia IPJ, Warszawa 1999.