zajęcia otwarte z fizyki

WYZNACZANIE PROMIENIOWANIA RADONU

Instrukcja dla uczniów szkół ponadpodstawowych

WSTĘP

I. ROZPAD PROMIENIOTWÓRCZY I RODZAJE PROMIENIOWANIA JĄDROWEGO

Rozpadem promieniotwórczym (przemianą promieniotwórczą) nazywamy proces, w którym jądro atomowe samorzutnie zmienia swoją liczbę masową i/lub atomową, a zmianie tej towarzyszy emisja **promieniowania jonizującego**, czyli takiego, które ma zdolność jonizacji materii.

Istnieją trzy podstawowe rodzaje promieniowania jonizującego, które powstają w wyniku procesów jądrowych:

- **promieniowanie** α – jest to strumień cząstek α, lub inaczej jąder ^{4}He, składających się z dwóch protonów i dwóch neutronów. Emisja tego promieniowania zachodzi w wyniku **rozpadu** α, w którym ciężkie jądro zamienia się w lżejsze „pozbywając się" cząstki α ze swojego wnętrza.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y^{*} + \alpha \tag{1} $$

  W wyniku tego rozpadu powstaje nowe jądro o liczbie masowej mniejszej o 4 i liczbie atomowej mniejszej o 2, które zazwyczaj jest w stanie wzbudzonym.

- **promieniowanie** β – jest to strumień cząstek powstający w wyniku jednej z **przemian** β:
  - **przemiana** β^- – jest to przemiana, w której neutron we wnętrzu jądra zamienia się w proton, a zamianie takiej towarzyszy emisja elektronu oraz antyneutrina elektronowego:

$$ n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu_e} \tag{2} $$
$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y^{*} + e^- + \overline{\nu_e} \tag{3} $$

    W wyniku takiej przemiany powstaje nowe jądro o liczbie masowej równej liczbie masowej jądra pierwotnego i liczbie atomowej o jeden większej niż jądro pierwotne. Nowe jądro prawie zawsze znajduje się w stanie wzbudzonym.
  - **przemiana** β^+ – jest to przemiana, w której proton we wnętrzu jądra przemienia się w neutron, a zamianie takiej towarzyszy emisja pozytonu (antycząstki elektronu) oraz neutrina elektronowego:

$$ p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \tag{4} $$
$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y^{*} + e^+ + \nu_e \tag{5} $$

    W wyniku takiej przemiany powstaje nowe jądro o liczbie masowej równej liczbie masowej jądra pierwotnego i liczbie atomowej o jeden mniejszej niż jądro pierwotne. Nowe jądro prawie zawsze znajduje się w stanie wzbudzonym.

- **promieniowanie** γ – jest to promieniowanie elektromagnetyczne, które jest emitowane w procesie przejścia jądra ze stanu wzbudzonego do podstawowego. Dlatego też, promieniowanie γ jest obserwowane w towarzystwie pozostałych dwóch rodzajów promieniowania – zarówno w rozpadzie α jak i każdej z przemian β nowe powstałe jądro

WYDZIAŁ FIZYKI UNIWERSYTET WARSZAWSKI
Polskie Towarzystwo Fizyczne Oddział Warszawski
projekt współfinansuje miasto stołeczne Warszawa

musi przejść ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego właśnie przy pomocy emisji promieniowana γ.

$$ {}^{A}_{Z}Y^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + \gamma \tag{6}$$

II. ŹRÓDŁA TŁA PROMIENIOTWÓRCZEGO

Obecnie znanych jest ok 2500 jąder atomowych (to znaczy, wszystkich izotopów wszystkich pierwiastków, które występują na Ziemi lub zostały sztucznie wytworzone przez człowieka), a jedynie ok. 300 z nich to izotopy stabilne, czyli takie, które nie ulegają samoistnie jednemu z wcześniej opisanych procesów. Nic więc dziwnego, że w swoim codziennym życiu, często nawet nieświadomie, mamy do czynienia z substancjami promieniotwórczymi. Ich obecność w naszym świecie w większości przypadków jest zupełnie naturalna i istniała na długo przed pojawieniem się człowieka na Ziemi. To właśnie dlatego możemy mówić o tle promieniotwórczym.

Tło promieniotwórcze zwyczajowo dzielimy ze względu na źródła jego pochodzenia na sztuczne i naturalne.

Sztuczne źródła tła promieniotwórczego to wszystkie te źródła, które wynikają z działalności człowieka. W Polsce, dawka, którą otrzymuje przeciętny obywatel od takich źródeł stanowi 31,3% całkowitej rocznej dawki przyjmowanej od tła promieniotwórczego. W skład tych źródeł wchodzą:

- diagnostyka i terapia medyczna (30,9% całkowitej dawki)
- awarie elektrowni jądrowych (0,2% całkowitej dawki)
- inne (0,2% całkowitej dawki)

Naturalne źródła tła promieniotwórczego to źródła promieniowania jonizującego, które występują na Ziemi w sposób naturalny, niezależny od człowieka. Dawka, którą otrzymuje przeciętny mieszkaniec Polski od tych źródeł to ok. 68,7% całkowitej dawki. Przyjrzyjmy się źródłom tego naturalnego wkładu do tła promieniotwórczego:

- radon (33,7% całkowitej dawki)
- promieniowanie gamma (13% całkowitej dawki)
- promieniowanie kosmiczne (10,9% całkowitej dawki)
- promieniowanie wewnętrzne (8,3% całkowitej dawki)
- toron (2,8% całkowitej dawki)

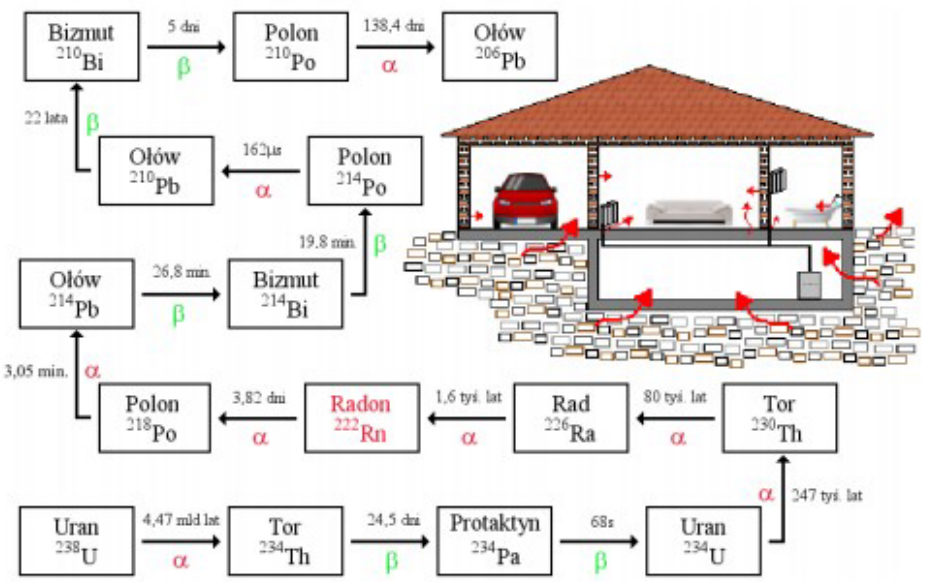
Jak widać największy udział w naturalnych źródłach tła promieniotwórczego ma radon, a konkretniej jest to izotop radonu ^{222}Rn. Pojawia się pytanie skąd bierze się ten izotop i dlaczego jego obecność jest tak kluczowa w kontekście otrzymywanej przez nas dawki?

WYDZIAŁ FIZYKI UNIWERSYTET WARSZAWSKI
Polskie Towarzystwo Fizyczne Oddział Warszawski
projekt współfinansuje miasto stołeczne Warszawa

III. RADON

Skorupa ziemska zbudowana jest z wielu różnych pierwiastków. Jednym z nich jest Uran. Naturalnie występują trzy izotopy uranu: ^{238}U ($T_{1/2}$ ~10^9 lat, występowanie 99,2745%), ^{235}U ($T_{1/2}$ ~108 lat, występowanie 0,72%) oraz ^{234}U ($T_{1/2}$ ~105 lat, występowanie 0,0055%). Z uwagi na bardzo długie czasy połowicznego zaniku, izotopy te, mimo, że niestabilne przetrwały w skorupie ziemskiej do dziś.

Tak się składa, że ^{238}U, którego jest najwięcej, rozpada się za pomocą rozpadu α do ^{234}Th, który również jest niestabilny i rozpada się do kolejnego niestabilnego jądra. W ten sposób tworzy się łańcuch następujących po sobie rozpadów, które nazywamy szeregiem promieniotwórczym. Na naszej planecie naturalnie występują trzy takie szeregi. Przebieg kolejnych rozpadów w szeregu zapoczątkowanym przez ^{238}U można prześledzić na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg kolejnych rozpadów w szeregu uranowym.

Na rysunku na czerwono zaznaczony został radon ^{222}Rn. Radon jest bezbarwnym, bezwonnym gazem szlachetnym, w przeciwieństwie więc do wszystkich poprzednio powstałych izotopów, nie ma on problemu z opuszczeniem wnętrza skorupy ziemskiej, gdzie jest produkowany. Jako gaz, który nie oddziałuje chętnie z innymi atomami, bez przeszkód dyfunduje poprzez skały, fundamenty naszych domów, ściany i sufity gromadząc się w piwnicach i na parterach naszych domów. Oczywiście stężenie radonu w budynku będzie ściśle zależało od podłoża, na którym ten budynek stoi oraz od tego jak często dane pomieszczenie jest wietrzone. Radon oraz produkty jego rozpadu mogą przyklejać się do unoszących się w powietrzu aerozoli, które następnie wdychamy z powietrzem do naszych płuc. W ten sposób kolejne izotopy promieniotwórcze rozpadają się w naszym organizmie bezpośrednio na niego oddziałując. Należy jednak pamiętać o tym, że dawka, którą otrzymujemy od tego procesu to jedynie ok. 1/3 całkowitej dawki, którą otrzymujemy z samego faktu życia na Ziemi.

WYDZIAŁ FIZYKI UNIWERSYTET WARSZAWSKI
Polskie Towarzystwo Fizyczne Oddział Warszawski
projekt współfinansuje miasto stołeczne Warszawa

POMIARY

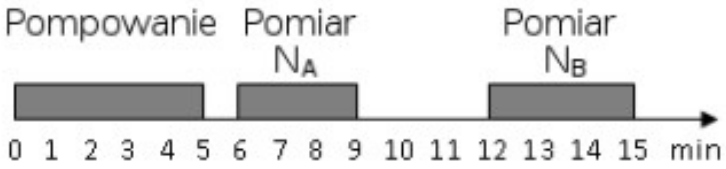
I. POMIAR ZASIĘGU CZĄSTEK α W POWIETRZU

Układ pomiarowy:
- licznik cząstek α z detektorem scyntylacyjnym
- źródło cząstek α (żarnik lampy gazowej)
- kartka papieru

W trakcie tej części ćwiczenia należy w sposób jakościowy ocenić zasięg cząstek α w powietrzu, zbliżając i oddalając „źródło" od detektora. Należy sprawdzić również jak zmieni się pokazywana przez licznik ilość zliczeń, jeśli między źródłem a detektorem umieścimy kartkę papieru. Czy zasięg cząstek α, rozumiany jako grubość powietrza jaka jest potrzebna by detektor przestał je rejestrować, jest duży czy mały? Dlaczego? Czy dla promieniowania β i γ spodziewalibyśmy się większego czy mniejszego zasięgu? Dlaczego?

II. POMIAR AKTYWNOŚCI PRODUKTÓW ROZPADU RADONU W POWIETRZU

Naszym celem będzie wyznaczenie aktywności produktów rozpadu radonu w 1 m^3 powietrza. Do uzyskania tej informacji wykorzystamy metodę Markova.
Cykl pomiarowy wygląda następująco (rysunek 2):
- przy pomocy odkurzacza pompujemy przez 5 min powietrze przez specjalną tkaninę będącą filtrem, na którym osadzają się aerozole z „przylepionymi" do nich promieniotwórczymi produktami rozpadu radonu
- w ciągu 1 minuty przenosimy filtr na detektor i wykonujemy pomiary liczby cząstek α. Liczbę zliczeń zapisujemy co 1 min w tabeli 1.



Rys. 2. Cykl pomiarowy w metodzie Markova

Aby obliczyć aktywność radonu w mierzonym powietrzu należy skorzystać ze wzoru:

$$C = \frac{7{,}3\cdot 10^{-5}\cdot(N_A - N_B)}{\varepsilon\cdot\eta\cdot v}\left[\frac{\mathrm{Bq}}{\mathrm{m}^3}\right] \qquad (7)$$

gdzie:
N_A – suma liczby zliczeń w 7, 8 i 9 minucie,
N_B – suma liczby zliczeń w 13, 14 i 15 minucie,
ε – wydajność rejestracji cząstek α (można przyjąć ε = 0,4),
η – efektywność zatrzymywania produktów rozpadu radonu na filtrze (można przyjąć η = 0,9),
v - prędkość pompowania powietrza w $\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right]$.

WYDZIAŁ FIZYKI UNIWERSYTET WARSZAWSKI
Polskie Towarzystwo Fizyczne Oddział Warszawski
projekt współfinansuje miasto stołeczne Warszawa

Tabela 1. Wyniki pomiarów.

Czas [min]	Zarejestrowana liczba zliczeń	Liczba zliczeń w 1 min
1-5	Pompowanie powietrza	
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

W celu wyznaczenia prędkości pompowania powietrza przez filtr posłużymy się dużym workiem foliowym. Worek należy napompować powietrzem z odkurzacza (w tym czasie na odkurzaczu powinien być założony filtr) mierząc jednocześnie stoperem czas pompowania. Prędkość pompowania powietrza wyznaczymy na podstawie wzoru:

$$v = \frac{V}{t}\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right] \tag{8}$$

gdzie:
t – czas pompowania worka odkurzaczem,
V – objętość napompowanego worka, równa objętości przepompowanego powietrza:

$$V = \pi r^2 l \tag{9}$$

gdzie:
r – promień podstawy walca, który utworzył napompowany worek (trudny do zmierzenia),
l – długość walca.
Możemy skorzystać z zależności obwodu walca od jego promienia. Wówczas $2\pi r = 2d$, gdzie d jest szerokością rozłożonego worka i ostatecznie $r = \frac{d}{\pi}$.
Wtedy:

$$V = \pi l \frac{d^2}{\pi^2} = \frac{l d^2}{\pi} \tag{10}$$

Tabela 2: Wyniki pomiarów prędkości pompowania powietrza

szerokość worka d [m]	czas pompowania t [s]	długość walca l [m]	objętość powietrza V [m^3]	prędkość pompowania $v\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right]$

UWAGA Istnieje możliwość wykonania pomiaru objętości przepompowanego powietrza za pomocą licznika dostępnego w sali. Instrukcja obsługi licznika powinna znajdować się w laboratorium.

Ostatecznie wartość C wyznaczona za pomocą wzoru (7) wynosi:

$$C = _____ \left[\frac{\mathrm{Bq}}{\mathrm{m}^3}\right]$$

Porównaj otrzymaną wartość z tabelą 3. Czy otrzymany wynik odpowiada wartościom teoretycznym?

Tabela 3: Aktywność produktów rozpadu radonu w naszym otoczeniu

Miejsce pomiaru	**Aktywność** $\left[\frac{\mathrm{Bq}}{\mathrm{m}^3}\right]$
Powietrze przy gruncie	10
Wietrzony pokój	40
Zamkniety pokój	80
Piwnice	400
Pieczara	10000

MATERIAŁ DODATKOWY - PRAWO ZANIKU PROMIENIOTWÓRCZEGO

Wzorem opisującym dynamikę rozpadów jąder atomowych jest tzw. prawo rozpadu promieniotwórczego:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \tag{11}$$

gdzie:
$N(t)$ – ilość jąder w próbce w chwili czasowej t,
N_0 – ilość jąder w próbce na początku,
λ – stała rozpadu charakterystyczna dla każdego jądra,
$e \approx 2{,}72$ – liczba Eulera, podstawa logarytmu naturalnego.
Ważną wielkością fizyczną, którą można wyprowadzić z prawa rozpadu promieniotwórczego jest okres połowicznego rozpadu – $T_{1/2}$. Jest to czas, po którym z początkowej liczby jąder promieniotwórczych danego izotopu w jakiejś próbce, pozostaje ich połowa. Podstawiając więc do wzoru (11) $t = T_{1/2}$ oraz $N(1/2) = \frac{N_0}{2}$ otrzymujemy:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$
$$\ln\frac{1}{2} = -\lambda T_{1/2}$$
$$\ln 2 = \lambda T_{1/2}$$

stąd:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \tag{12}$$

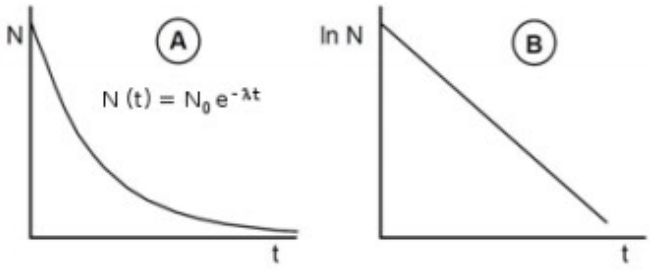
Wykres przykładowego rozpadu promieniotwórczego przedstawiono na rysunku 3.
Rysunek 3 (A) przedstawia znany nam już zapis zależności liczby atomów od czasu (wzór 11). W części (B) ten sam wykres przedstawiono w skali półlogarytmicznej. Kolejne przekształcenia prowadzące do uzyskania równania prostej z części B przedstawiono poniżej.

$$\ln[N(t)] = \ln\left[N_0 e^{-\lambda t}\right]$$
$$\ln[N(t)] = \ln[N_0] - \lambda t \tag{13}$$

przez analogię wzoru (13) z równaniem prostej:

$$y = ax + b$$

możemy stwierdzić, że współczynnik kierunkowy prostej na rysunku 3 (B) to stała rozpadu λ.



Rys. 3. Rozpad promieniotwórczy w skali liniowej (A) i półlogarytmicznej (B).

Opracowanie:
N. Sokołowska, A. Drabińska

WYDZIAŁ FIZYKI UNIWERSYTET WARSZAWSKI
Polskie Towarzystwo Fizyczne Oddział Warszawski
projekt współfinansuje miasto stołeczne Warszawa