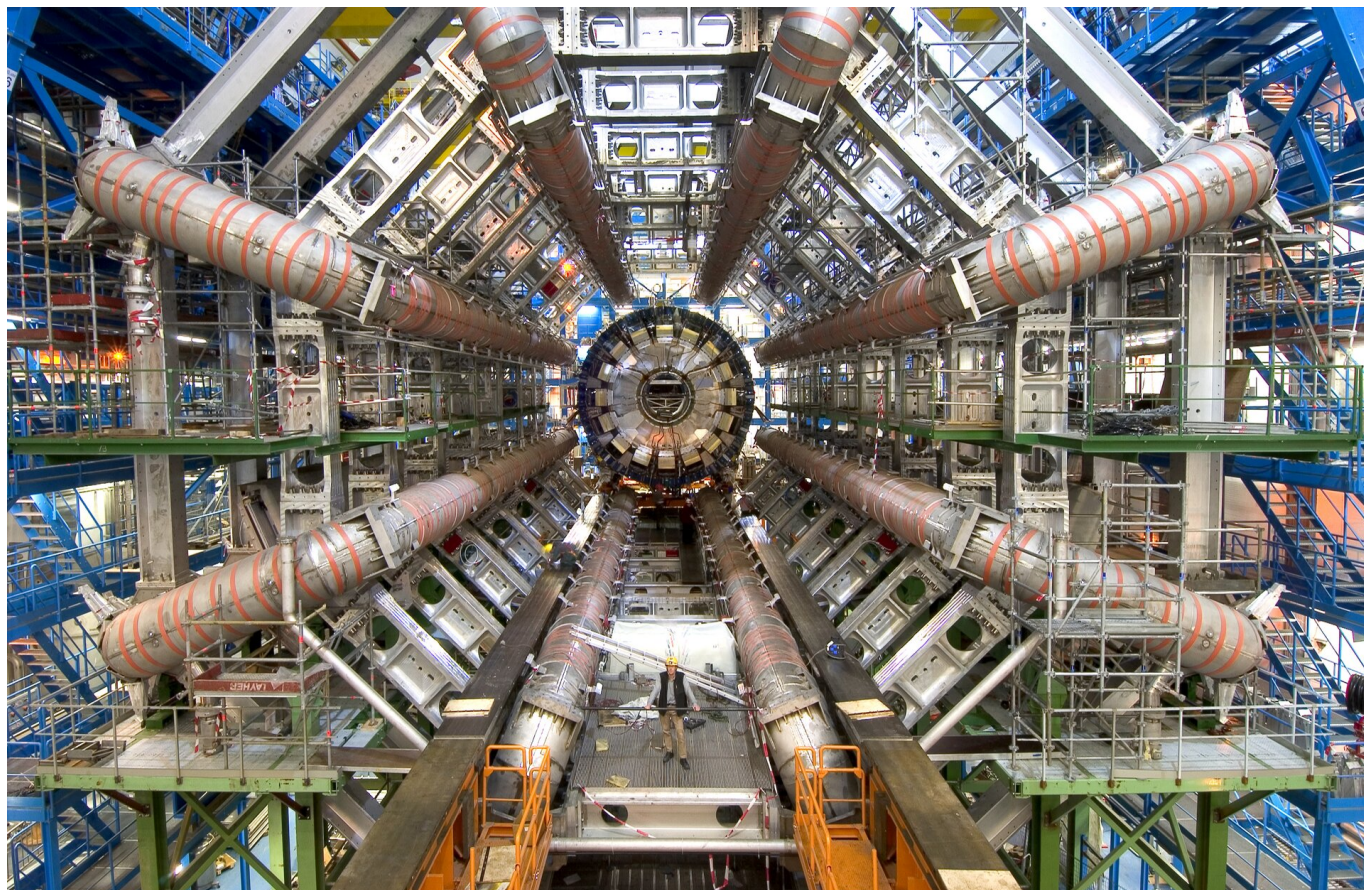




Równowaga promieniotwórcza

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Symulacja interaktywna](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Źródło: Maximilien Brice, dostępny w internecie: <http://cds.cern.ch/record/910381> [dostęp 10.07.2022], licencja: CC BY 4.0.

Czy to nie ciekawe?

Izotopy promieniotwórcze istniejące na Ziemi pochodzą głównie z rozpadów naturalnych, długożyjących izotopów – na przykład izotop uranu $^{238}_{92}\text{U}$ ma czas połowicznego rozpadu $4,51 \cdot 10^9$ lat. Izotopy te zawarte były w materiale, z którego powstała Ziemia. Dzięki bardzo długiemu czasowi życia tych izotopów dochodzi do powstania stanu równowagi promieniotwórczej, gdy w pewnych okresach stosunek zawartości na Ziemi poszczególnych izotopów jest w przybliżeniu stały.

Twoje cele

- dowiesz się, na czym polega stan równowagi promieniotwórczej,
- poznasz warunki niezbędne do powstania stanu równowagi promieniotwórczej,
- zrozumiesz, z czego wynikają warunki powstania stanu równowagi promieniotwórczej,
- zastosujesz zdobytą wiedzę do rozwiązywania problemów.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Za stabilne uznaje się te jądra atomowe, dla których nie zaobserwowano naturalnych rozpadów promieniotwórczych. Rozpady te obserwuje się dla wszystkich jąder o liczbie atomowej powyżej 82 – są to zatem jądra niestabilne. Na ile trwałe są niestabilne jądra można opisać tak zwanym czasem połowicznego rozpadu, który jest oznaczany symbolem $T_{1/2}$ lub T , a także stałą rozpadu oznaczaną literą λ .

Czasem połowicznego rozpadu T nazywa się czas, po którym rozpadnie się około połowa wyjściowej liczby jąder, natomiast **stała rozpadu** λ jest równa prawdopodobieństwu zajścia rozpadu jednego jądra atomowego w jednostce czasu. Związek między czasem połowicznego rozpadu a stałą rozpadu można opisać wzorem:

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

Za pomocą stałej rozpadu lub czasu połowicznego rozpadu można zdefiniować prawo rozpadu promieniotwórczego. Mówi ono o tym, jak z upływem czasu zmienia się liczba jąder promieniotwórczych. Prawo to ma postaci:

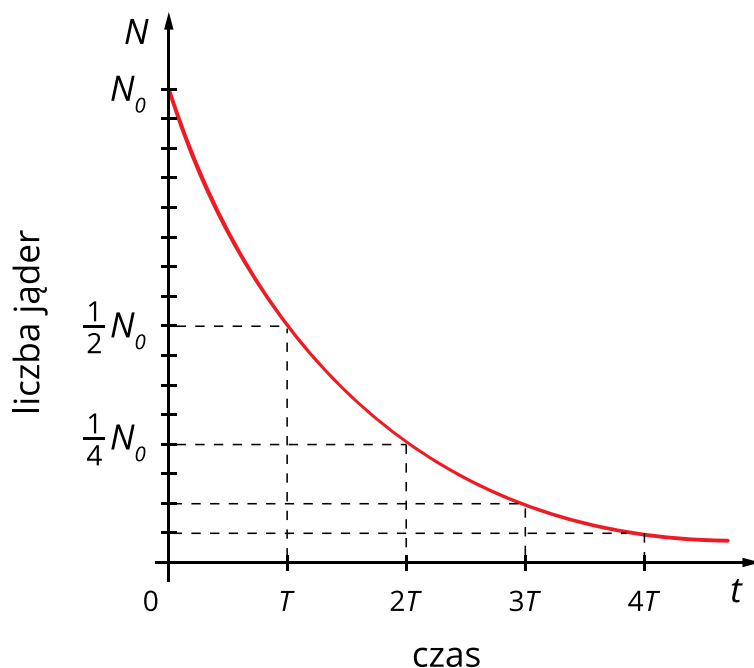
$$N = N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T}}$$

lub

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

W równaniach tych N_0 to początkowa liczba jąder promieniotwórczych, a N – liczba jąder, która pozostała po czasie t . Należy pamiętać, że równania te mają sens dla bardzo dużej liczby jąder i gdy mamy na przykład 8 jąder, to po czasie połowicznego rozpadu nie muszą się rozpaść cztery jądra. Mogą rozpaść się wszystkie, ale także może nie rozpaść się żadne.

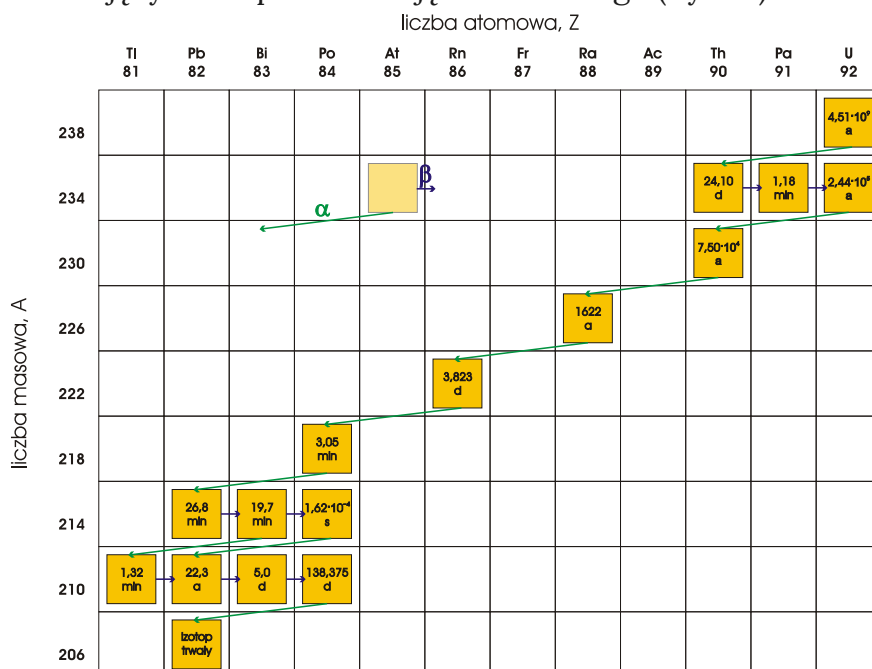
Wykres ilustrujący zmianę z czasem liczby jąder promieniotwórczych przedstawiono na Rys. 1.



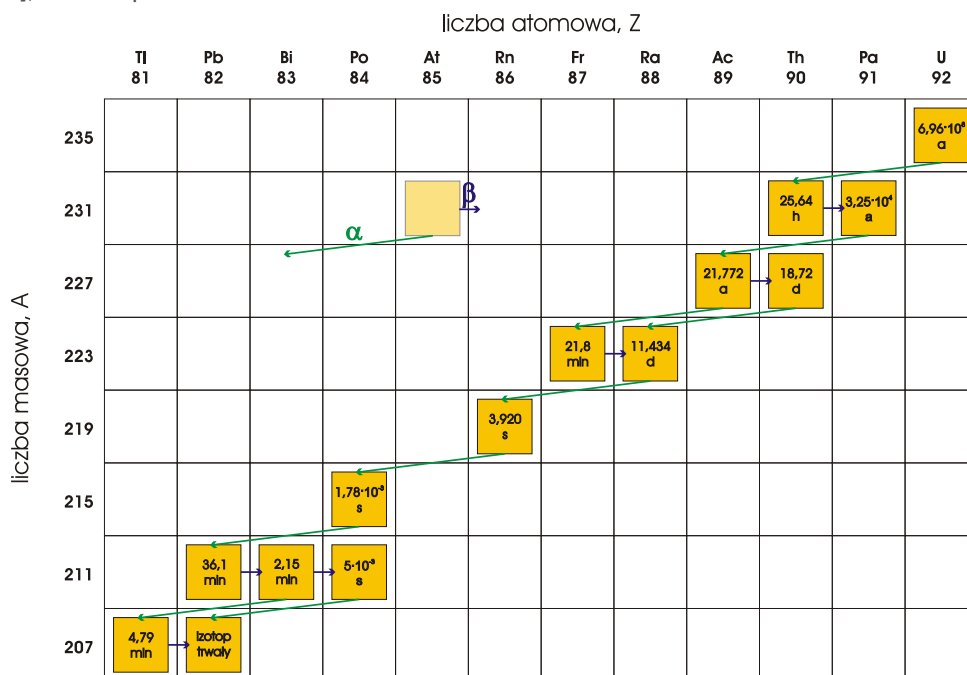
Rys. 1. Zależność liczby jąder promieniotwórczych od czasu. T to czas połowicznego rozpadu tych jąder.

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

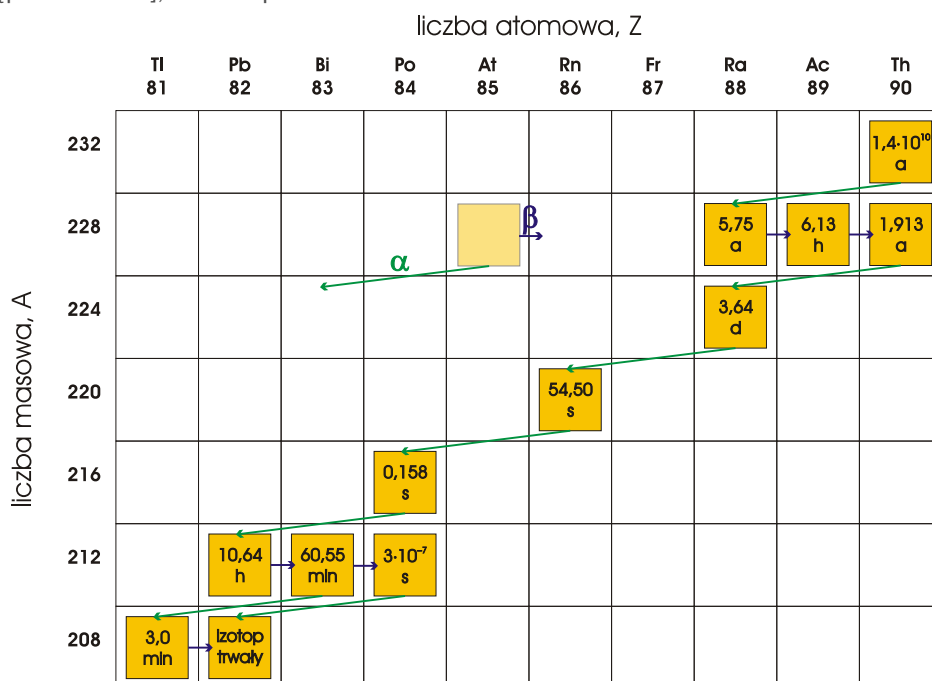
Większość **izotopów promieniotwórczych** istniejących na Ziemi pochodzi z rozpadu naturalnych, długożyjących izotopów zawartych w materiale, z którego powstała Ziemia. **Izotopy** te powstały w trakcie procesów związanych z ewolucją gwiazd. Są to na przykład uran $^{238}_{92}\text{U}$ o czasie połowicznego rozpadu $4,51 \cdot 10^9$ lat, tor $^{232}_{90}\text{Th}$ o czasie połowicznego rozpadu $1,405 \cdot 10^{10}$ lat, uran $^{235}_{92}\text{U}$ o czasie połowicznego rozpadu $7,038 \cdot 10^8$ lat i potas $^{40}_{19}\text{K}$ o czasie połowicznego rozpadu $1,25 \cdot 10^9$ lat. Jądra uranu i toru są początkiem tak zwanych szeregów promieniotwórczych, składających się z jąder powstających w wyniku kolejnych rozpadów, doprowadzających do powstania jądra stabilnego (Rys. 2.).



Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Szereg_promieniotw%C3%B3rczy_uranowo-radowy.svg [dostęp 10.07.2022], domena publiczna.



Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Szereg_promieniotw%C3%B3rczy_uranowo-aktywny.svg [dostęp 10.07.2022], domena publiczna.

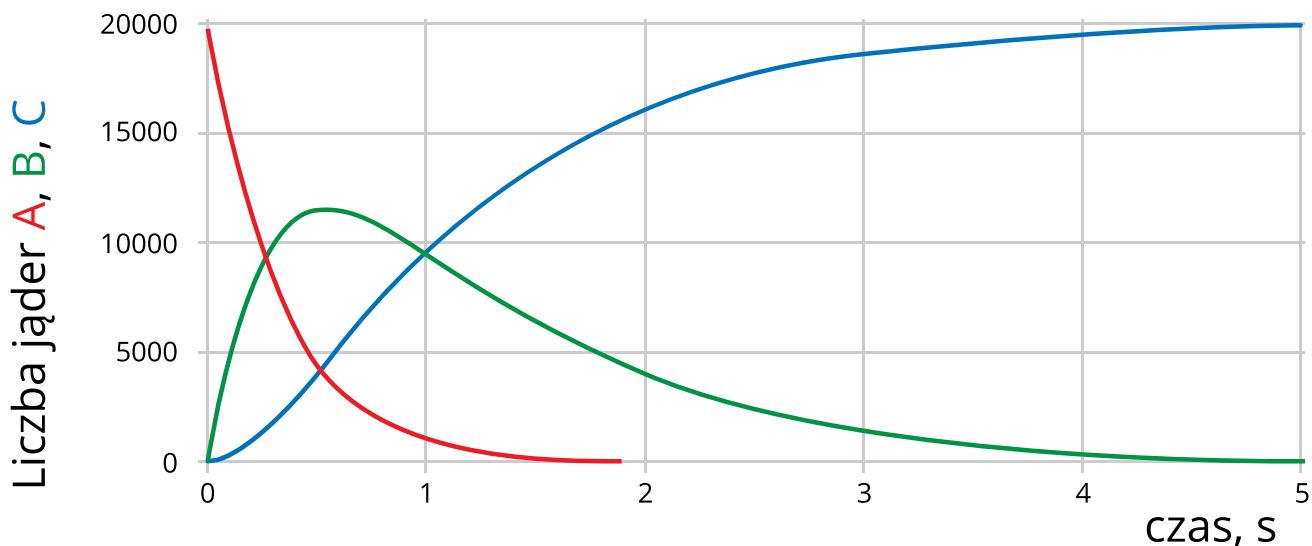


Rys. 2. Szeregi promieniotwórcze. W pomarańczowych prostokątach podane są czasy połowicznego rozpadu.

Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Szereg_promieniotw%C3%B3rczy_torowy.svg [dostęp 10.07.2022], domena publiczna.

Rozważmy trzy kolejne jądra z szeregu promieniotwórczego nazwane umownie A, B, C takie, że jądra A rozpadają się na jądra B, a jądra B rozpadają się na C.

Zmiana z czasem poszczególnych izotopów w dużej mierze zależy od wartości stałych rozpadu λ_A i λ_B . Przykładowe przebiegi zależności liczby jąder od czasu przedstawia wykres na Rys. 3.

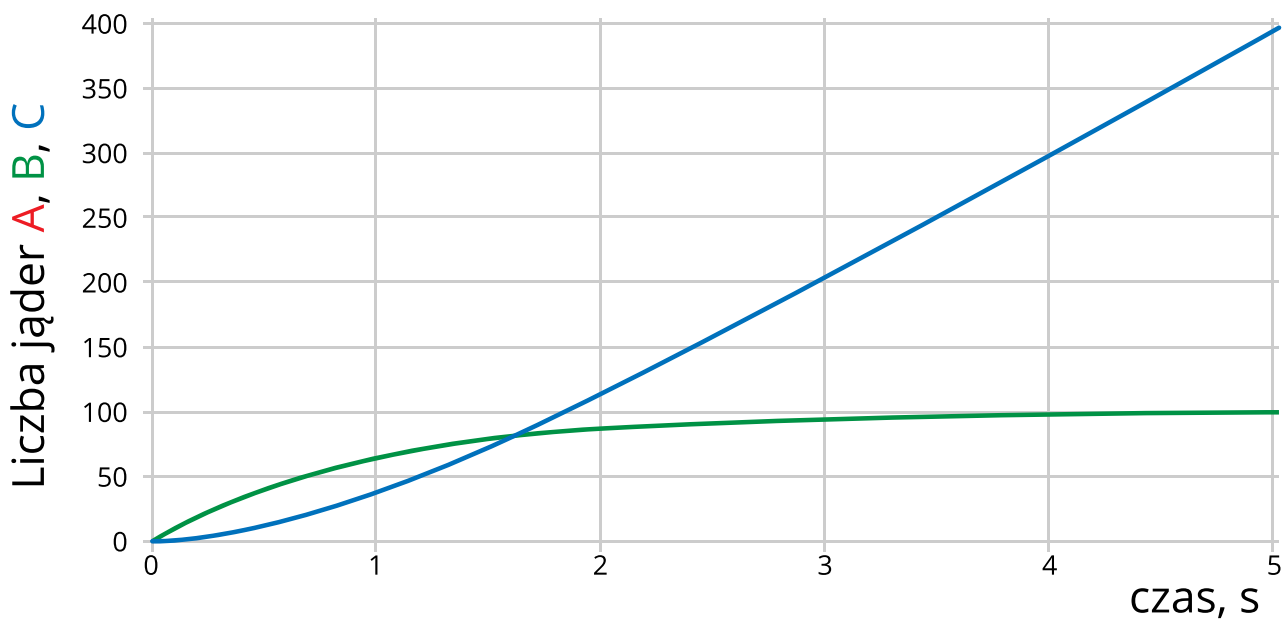


Rys. 3. Zmiana z czasem liczby jąder promieniotwórczych A, B i C w zależności od początkowej liczby jąder A. Jądra A rozpadają się na jądra B. Jądra B rozpadają się na jądra C, które są trwałe. Wykresy sporządzone dla: $N_{0A} = 20000$, $\lambda_A = 2 \text{ s}^{-1}$, $\lambda_B = 0,2 \text{ s}^{-1}$.

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

W przypadku, w którym $\lambda_A \ll \lambda_B$, czyli czas połowicznego rozpadu jąder A jest dużo dłuższy od czasu połowicznego rozpadu jąder B, dochodzi do sytuacji, w której liczba powstających w wyniku rozpadu jąder B jest równa liczbie rozpadających się jąder B – czyli liczba jąder B pozostaje stała. (Rys. 4.). Liczba rozpadów jąder A i B jest w tym przypadku jednakowa. **Taki stan nazywa się równowagą promieniotwórczą.** W stanie równowagi stosunek ilości atomów izotopów A i B jest zbliżony do stosunku ich stałych rozpadu

$$\frac{N_A}{N_B} \approx \frac{\lambda_B}{\lambda_A}.$$



Rys. 4. Zmiana z czasem liczby jąder B i C, dla przypadku gdy $\lambda_A \ll \lambda_B$. Jądra B powstają z jąder A. Jądra A nie są zaznaczone na wykresie ponieważ ich liczba wyjściowa wynosi 20 000, a ze względu na duży czas połowicznego rozpadu zmiana ich liczby w badanym czasie jest pomijalnie mała. Wykres sporządzony dla $\lambda_A = 0,005 \text{ 1/s}$ (czas połowicznego rozpadu $T_A = 60,206 \text{ s}$), $\lambda_B = 1 \text{ 1/s}$ (czas połowicznego rozpadu $T_B = 0,301 \text{ s}$).

W praktyce z tego typu sytuacją mamy do czynienia w przypadku szeregów promieniotwórczych. Bardzo długi czas połowicznego rozpadu pierwszego jądra w szeregu decyduje o zawartości na Ziemi kolejnych atomów z tych szeregów. Doprowadza to do czasowego ustalenia zawartości poszczególnych izotopów na Ziemi. Na przykład w szeregu uranowo-radowym czas połowicznego rozpadu pierwszego jądra tego szeregu – $^{238}_{92}\text{U}$ – wynosi 4,5 miliarda lat, drugiego, toru $^{234}_{90}\text{Th}$, 21,4 doby, piątego w szeregu toru $^{230}_{90}\text{Th}$ – 75 tysięcy lat i szóstego – radu $^{226}_{88}\text{Ra}$ 1600 lat. Natomiast następnego w szeregu – radonu $^{222}_{86}\text{Rn}$, który powstaje w wyniku rozpadu radu, tylko około 3,5 doby. Jak widać, w wielu przypadkach istnieją warunki osiągnięcia równowagi promieniotwórczej. Na przykład o zawartości radonu $^{222}_{86}\text{Rn}$ bezpośrednio decyduje zawartość radu $^{226}_{88}\text{Ra}$. Ponieważ jednak czasy rozpadów kolejnych izotopów w szeregu są dużo mniejsze niż pierwszego w szeregu uranu, o zawartości kolejnych izotopów ostatecznie decyduje zawartość na Ziemi pierwszego w szeregu izotopu uranu $^{238}_{92}\text{U}$.

Radon jest promieniotwórczym gazem szlachetnym. Na Ziemi istnieje dzięki rozpadom promieniotwórczym. Izotop $^{222}_{86}\text{Rn}$ powstający w szeregu uranowo-radowym i produkty jego rozpadu są źródłem około 40% naturalnego promieniowania tła na Ziemi.

Słowniczek

Izotopy

(ang.: *isotopes*) – odmienne postacie atomów pierwiastka chemicznego, różniące się liczbą neutronów w jądrze (z definicji atomy tego samego pierwiastka mają tę samą liczbę protonów w jądrze). Izotopy tego samego pierwiastka różnią się liczbą masową (łącznie liczbą neutronów i protonów w jądrze), ale mają tę samą liczbę atomową (liczbę protonów w jądrze).

Izotopy promieniotwórcze radioizotopy, radionuklidy

(ang.: *radioactive isotopes*, *radioisotopes*, *radionuclides*) – odmiany pierwiastków (izotopy), których jądra atomów są niestabilne i samorzutnie ulegają przemianie promieniotwórczej. W wyniku tej przemiany powstają inne jądra atomowe, emitowane są cząstki elementarne, a także uwalniana jest energia w postaci energii kinetycznej produktów przemiany oraz przeważnie (choć nie zawsze) emitowane jest promieniowanie gamma.

Symulacja interaktywna

Równowaga promieniotwórcza

Symulacja ilustruje dojście do równowagi promieniotwórczej w układzie trzech jąder. Jądra A rozpadają się na jądra B, które z kolei rozpadają się na trwałe jądra C.

Warunkiem osiągnięcia stanu równowagi jest dużo dłuższy czas połowicznego rozpadu jąder A niż jąder B. W przedstawionej symulacji czas połowicznego rozpadu jąder A wynosi 60,206 s a jąder B 0,301 s. Stan równowagi trwa do chwili, gdy ubytek jąder A staje się zauważalny.



Zasób interaktywny dostępny pod adresem <https://zpe.gov.pl/a/D52PITrOk>

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Polecenie 1

Zastanów się nad tym, dlaczego liczba jąder C rośnie na animacji liniowo z czasem.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Jądrami promieniotwórczymi są jądra, które:

- ☐ mają liczbę atomową powyżej 82
- ☐ mają więcej niż 82 neutrony
- ☐ mają liczbę masową powyżej 82
- ☐ ulegają samorzutnym rozpadom promieniotwórczym

Ćwiczenie 2



Spośród podanych zdań wybierz poprawne:

- ☐ Z szesnastu istniejących jąder, po czasie połowicznego rozpadu, musi się rozpaść 8.
- ☐ Z miliona istniejących jąder, po czasie połowicznego rozpadu, rozpadnie się dokładnie 500000 jąder.
- ☐ Czasem połowicznego rozpadu nazywa się czas, po którym rozpadnie się około połowa wyjściowej liczby jąder.
- ☐ Z miliona istniejących jąder, po czasie połowicznego rozpadu, rozpadnie się około 500000 jąder.

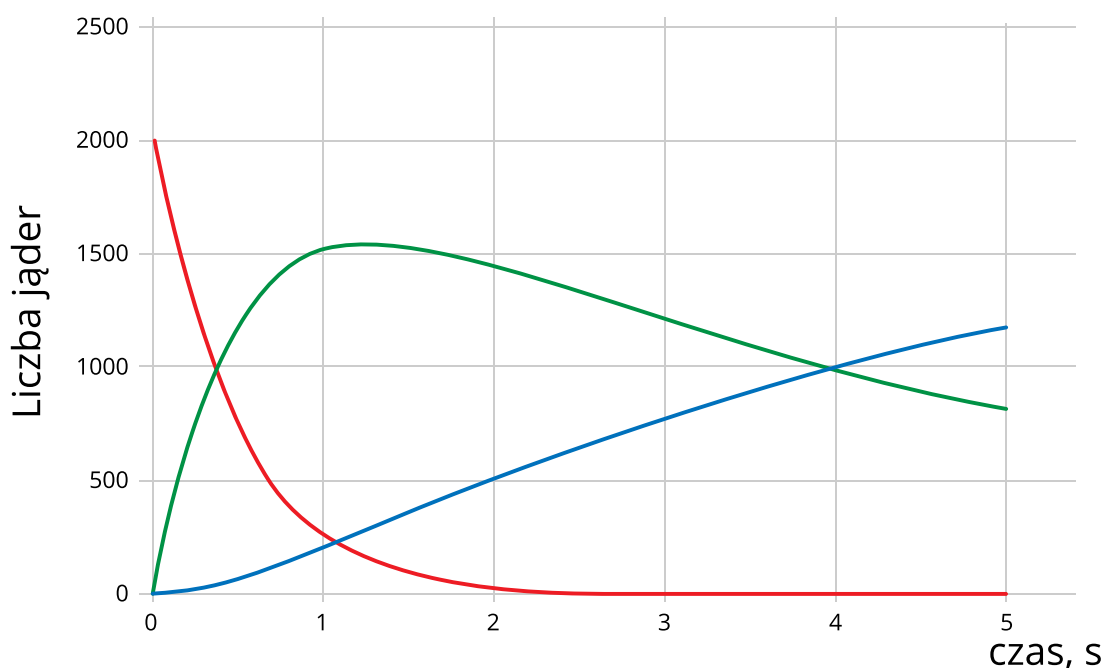
Ćwiczenie 3



Oblicz stałą rozpadu izotopu uranu $^{238}_{92}\text{U}$ wiedząc, że czas połowicznego rozpadu tego izotopu wynosi 4,5 miliarda lat. Wynik podaj z dokładnością do trzech cyfr znaczących.

Odp.: $\lambda =$ $\cdot 10^{-10}$ 1/rok

Ćwiczenie 4



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Wykres przedstawia zależność liczby jąder od czasu trzech rodzajów izotopów promieniotwórczych X (zielona krzywa), Y (niebieska krzywa), Z (czerwona krzywa). Jądra te są kolejnymi składnikami szeregu promieniotwórczego. Określ kolejność tych jąder w szeregu.

Y

Z

X

Ćwiczenie 5



W szeregu uranowo – radowym wyjściowymi jądrami są jądra uranu $^{238}_{92}\text{U}$. Oblicz, ile rozpadów alfa i ile rozpadów beta musi zajść, aby z jądra $^{238}_{92}\text{U}$ powstało jądro $^{222}_{86}\text{Rn}$. Którym z kolei jądrem w szeregu jest jądro radonu? Wyniki podaj cyfrą z dokładnością do jednej cyfry znaczącej.

Odp.: Zajądą rozpadów alfa i beta. Jądro radonu jest w szeregu.

Ćwiczenie 6



Czas połowicznego rozpadu jądra $^{223}_{88}\text{Ra}$ wynosi około 11,4 doby, a powstałego w wyniku tego rozpadu jądra radonu $^{219}_{86}\text{Rn}$ 3,92 s. Oblicz stosunek stałych rozpadów tych jąder. Czy w tym przypadku może dojść do czasowej równowagi promieniotwórczej jąder radonu? Wyniki podaj z dokładnością do jednej cyfry znaczącej.

Odp.: $\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn}} \approx \boxed{} \cdot 10^{\boxed{}}$.

Ćwiczenie 7



Uzupełnij zdanie:

Jeżeli jądra A rozpadają się na jądra B, które rozpadają się na jądra C, to warunkiem

utrzymania się w przybliżeniu stałej liczby jąder B jest dużo /

wartość stałej rozpadu jąder A niż B. Wynika z tego, że czas połowicznego rozpadu jąder

A musi być dużo / niż jąder B.

Ćwiczenie 8



Oceń prawdziwość zdań. Zaznacz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F – jeśli zdanie jest fałszywe:

Stan równowagi promieniotwórczej może trwać dowolnie długo. /

Jeżeli jądra A rozpadają się na jądra B, które rozpadają się na jądra C, to czas trwania stanu

równowagi zależy od czasu połowicznego rozpadu jąder A. /

Ćwiczenie 9



Czas połowicznego rozpadu radu $^{226}_{88}\text{Ra}$ wynosi około 1600 lat. Natomiast powstającego z niego radonu $^{222}_{86}\text{Rn}$ - około 3,5 doby. Oszacuj stosunek liczby atomów radu do liczby atomów radonu w układzie izolowanym (zakładamy, że radon nie ucieka z układu). Wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Odp.: $\frac{N_{Ra}}{N_{Rn}} \approx \boxed{} \cdot 10^4$

Dla nauczyciela

Scenariusz lekcji:

Imię i nazwisko autora:	Jarosław Krakowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Równowaga promieniotwórcza
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, rozszerzenie podstawy programowej dla zakresu rozszerzonego
Podstawa programowa:	Cele kształcenia – wymagania ogólne II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. Zakres rozszerzony Treści nauczania – wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach. XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń: 12) opisuje rozpad izotopu promieniotwórczego; posługuje się pojęciem czasu połowicznego rozpadu; opisuje zasadę datowania substancji na podstawie węgla ^{14}C.
Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.: • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.

Cele operacyjne:	Uczeń: 1. tłumaczy, na czym polega stan równowagi promieniotwórczej, 2. podaje warunki niezbędne do powstania stanu równowagi promieniotwórczej, 3. wyjaśnia, z czego wynikają warunki powstania stanu równowagi promieniotwórczej.
Strategie nauczania:	IBSE (Inquiry-Based Science Education - nauczanie/uczenie się przedmiotów przyrodniczych przez odkrywanie/dociekanie naukowe)
Metody nauczania:	wykład problemowy
Formy zajęć:	praca zespołowa, praca w grupach
Środki dydaktyczne:	grafika ilustrująca szeregi promieniotwórcze, symulacja lub arkusz Excel pozwalający modelować zmiany w czasie liczby jąder promieniotwórczych w rozpadach sekwencyjnych; komputer z dostępem do Internetu i rzutnik
Materiały pomocnicze:	-
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel zadaje pytania: 1. Jakie izotopy nazywa się trwałymi, a jakie promieniotwórczymi? Uczniowie formułują odpowiedź: izotopy uznaje się za trwałe, jeżeli nie obserwuje się dla nich naturalnych rozpadów. Jeżeli obserwuje się naturalne rozpady, izotopy nazywa się promieniotwórczymi. 2. Jakie wielkości fizyczne opisują trwałość izotopów promieniotwórczych? Uczniowie formułują odpowiedź: wielkościami tymi są stała rozpadu i czas połowicznego rozpadu. 3. Skąd się biorą izotopy promieniotwórcze na Ziemi? Uczniowie formułują odpowiedź: powstają w wyniku rozpadów długożyciowych izotopów zawartych w materii, z której powstała Ziemia, są wytwarzane w wyniku działania promieniowania kosmicznego.	
Faza realizacyjna:	

Uczniowie analizują wykresy ilustrujące naturalne szeregi promieniotwórcze zwracając uwagę na czasy połowicznego rozpadu kolejnych izotopów.

Nauczyciel przedstawia wykresy ilustrujące rozpady sekwencyjne w układzie trzech jąder (może również przedstawić równania opisujące zależność od czasu liczby jąder w tych rozpadach). Przedstawia też sposób działania symulacji lub arkusza Excel, pozwalającego modelować zależność od czasu liczby jąder promieniotwórczych w rozpadach sekwencyjnych.

Uczniowie w grupach analizują z wykorzystaniem symulacji zależność od czasu liczby jąder promieniotwórczych w rozpadach sekwencyjnych, w zależności od wartości stałych rozpadu. Formułują warunek powstania równowagi promieniotwórczej.

Faza podsumowująca

Uczniowie, wykorzystując zdobytą wiedzę, rozwiązują zadania: 1, 3, 5, 7 z zestawu ćwiczeń. Poprzez analizę wypowiedzi uczniów, w czasie omawiania zadań, nauczyciel określa, w jakim stopniu osiągnięte zostały wyznaczone cele.

Praca domowa:

W ramach powtórzenia i utrwalenia wiadomości uczniowie rozwiązują zadania: 2, 4, 6, 8, 9 z zestawu ćwiczeń.

**Wskazówki
metodyczne
opisujące różne
zastosowania
danego
multimedium**

Multimedium można wykorzystać przy powtarzaniu wiadomości i innych lekcjach na temat przemian jądrowych.