

## Opisujemy przemianę beta-

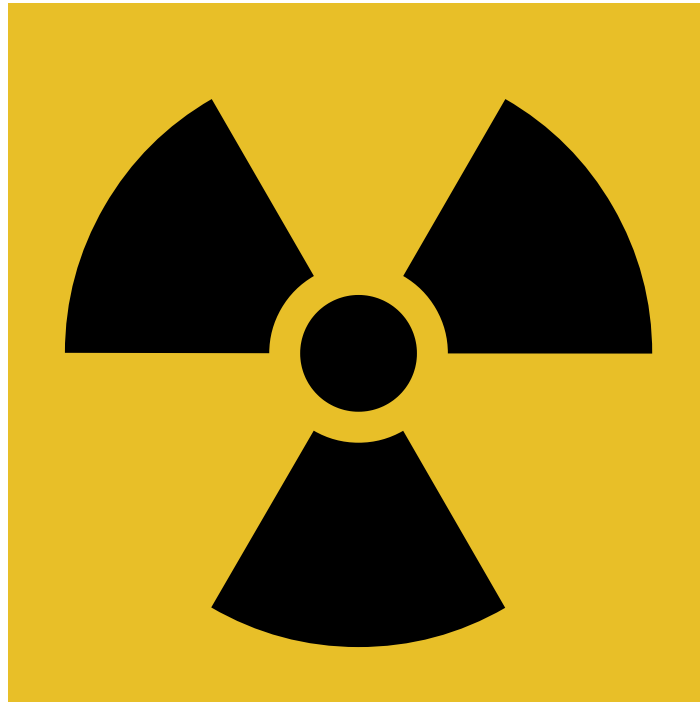
- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Grafika interaktywna](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



0899 Opisujemy przemianę beta-

## Czy to nie ciekawe?

Znakiem graficznym najczęściej kojarzonym z promieniotwórczością jest czarna koniczynka na żółtym tle (Rys. a.). Symbol ten ma za zadanie ostrzegać przed promieniowaniem jonizującym i potencjalnymi negatywnymi skutkami jego działania na organizm. Dziś jest on nie tylko spotykany w laboratoriach czy gabinetach diagnostyki rentgenowskiej, ale również w kinematografii, literaturze czy mediach, najczęściej mając za zadanie wywołania w odbiorcy niepokoju. Analizując codzienne sytuacje, w których spotykamy się w promieniotwórczością, dochodzimy jednak do wniosku, że w naszym życiu jej lepszym symbolem byłby banan, ziemniak lub pomidor. Dlaczego? O tym dowiesz się z tego e-materiału.



Rys. a. Symbol ostrzegający przed promieniowaniem [Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=516204>]

### **Twoje cele**

W tym e-materiale:

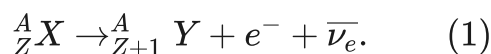
- dowiesz się, czym jest przemiana beta minus,
- zrozumiesz, czym jest oraz jak rozdziela się energia uwalniana w tej przemianie,
- zrozumiesz argumenty, jakie doprowadziły do zapostulowania istnienia neutrin,
- dowiesz się, jaki jest najbardziej rozpowszechniony na Ziemi izotop emitujący promieniowanie beta minus.

# Przeczytaj

---

## Warto przeczytać

**Przemiana beta minus** jest jednym z najważniejszych procesów, jakim ulegają jądra atomowe. Przemianę zapisuje się w formie następującego równania:



Prześledźmy kolejne człony równania. Z lewej strony strzałki znajduje się jądro początkowe pierwiastka X o liczbie atomowej  $Z$  i liczbie masowej  $A$ . W jądrze początkowym znajduje się więc  $Z$  protonów oraz  $A$  łącznie protonów i neutronów. Z prawej strony strzałki znajduje się jądro końcowe Y o liczbie atomowej  $Z + 1$  i masowej  $A$ , elektron, czyli **cząstka beta** ( $e^-$ ) oraz **antyneutrino elektronowe** ( $\bar{\nu}_e$ ). Skoro liczba atomowa uległa zwiększeniu o 1, to znaczy, że w jądrze końcowym wzrosła liczba protonów. Liczba masowa nie uległa zmianie, czyli sumaryczna liczba protonów i neutronów pozostała stała. Stąd natychmiast nasuwa się wniosek, że znajdujący się w jądrze neutron zmienił się w proton, elektron oraz antyneutrino elektronowe. Co ciekawe swobodny neutron, czyli neutron znajdujący się poza jądrem atomowym, nie jest cząstką stabilną i również ulega takiej przemianie. Najprostszą **przemianą beta minus** jest więc rozpad swobodnego neutronu.

Ostatnią cząstką występującą w równaniu (1) jest **antyneutrino elektronowe**. Antyneutrino jest cząstką elektrycznie obojętną, o znikomym małej masie i bardzo słabo oddziałującą z materią. Pozioma kreska wskazuje, że jest antycząstką neutrino elektronowego.

Pochodzące ze Słońca neutrino najczęściej przelatują przez Ziemię bez żadnego oddziaływania, czyli nie pozostawiając żadnego śladu po swojej wędrówce. Te dwie cechy sprawiły, że bardzo długo cząstka ta pozostawała dla uczonych zagadką. Istnienie (anty)neutrino po raz pierwszy zapostulował Wolfgang Pauli, w oparciu o rozkład energii elektronów wyemitowanych w przemianie beta. Skąd Pauli wiedział o obecności antyneutrino na długo przed tym, gdy udało się je zaobserwować doświadczalnie – postaram się wyjaśnić w dalszej części.

Przeanalizujmy równanie (1) w świetle zasady zachowania ładunku. Jądro początkowe ma  $Z$  protonów, czyli jego ładunek, wyrażony w jednostkach ładunku elementarnego, wynosi  $+Z$ . Ładunek jądra końcowego wynosi  $+(Z + 1)$ , zaś ładunek elektronu wynosi  $-1$ . Ładunek neutrino jest zerowy. Prawa strona równania zgadza się ze stroną lewą. Ładunek jest więc zachowany.

Przemiana beta jest procesem zachodzącym samoistnie. Oznacza to, że aby zaszła, musi być energetycznie „opłacalna”. Wyznaczenie całkowitej energii dostępnej w reakcji wymaga

znajomości mas substratów i produktów. Korzystając ze słynnego równania Einsteina  $E = mc^2$ , wskazującego związek między masą ( $m$ ) i energią ( $E$ ) zapisujemy:

$$Q_B = \left( m\left({}_Z^A X\right) - m\left({}_{Z+1}^A Y\right) \right) c^2, \quad (2)$$

Literą  $Q_B$  oznacza się całkowitą energię uwolnioną w przemianie beta, małą literą  $m$  oznaczono masę atomową substratu  $m\left({}_Z^A X\right)$  i produktu  $m\left({}_{Z+1}^A Y\right)$ , zaś literą  $c$  prędkość światła w próżni.

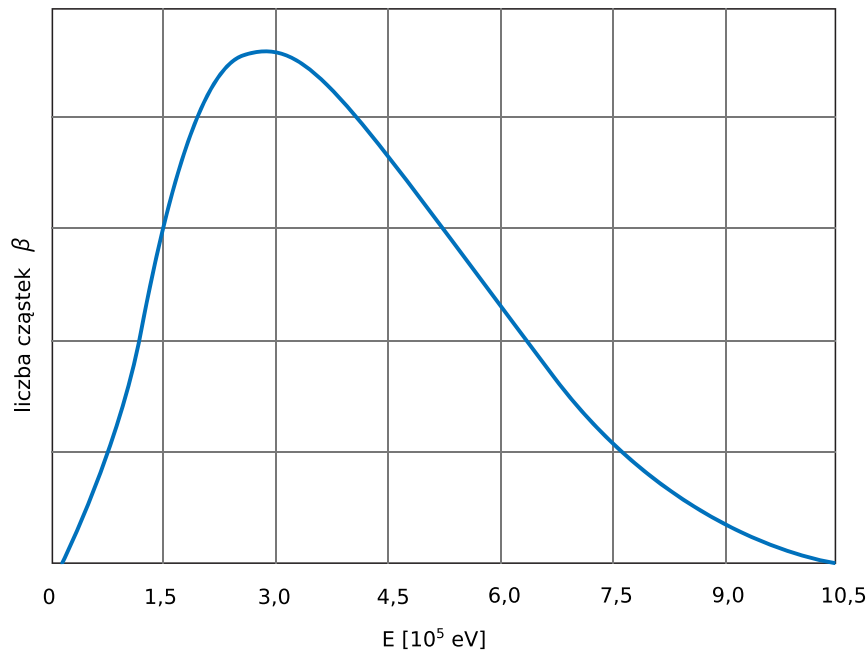
Być może zaniepokoiło Cię, że we wzorze nie pojawia się masa [cząstki beta](#) i [antyneutrino](#). Czy [cząstka beta](#) rzeczywiście nie została uwzględniona? Zgodnie z poprzednim akapitem mała litera  $m$  oznacza masę atomową, a więc masę jądra atomowego wraz z otaczającymi je elektronami. Człon  $m\left({}_Z^A X\right)$  uwzględnia masę  $Z$  elektronów, zaś człon  $m\left({}_{Z+1}^A Y\right)$  masę  $Z + 1$  elektronów. Bilans się więc zgadza: masa produktów uwzględnia dodatkowy elektron. Masę [antyneutrino](#) można zaś pominąć, jest ona tak mała, że do niedawna neutrino były uznawane za cząstki bezmasowe.

Masę atomową najczęściej podaje się w [atomowych jednostkach masy](#)  $u$ . Jednostka ta jest zdefiniowana jako 1/12 masy atomu węgla  $^{12}\text{C}$  i wynosi ok.  $1,66 \cdot 10^{-24}$  g.

Aby zaszła przemiana beta, wartość  $Q_B$  musi być dodatnia, czyli  $m\left({}_Z^A X\right) > m\left({}_{Z+1}^A Y\right)$ . Jądra atomowe, które spełniają ten warunek, mają znaczną przewagę liczby neutronów nad protonami. Zwróć uwagę, że większość stabilnych izotopów, czyli takich, które nie ulegają przemianom jądrowym, mają nieznacznie większą liczbę neutronów w jądrze niż protonów. Możesz to łatwo sprawdzić. Wyszukując w encyklopedii np. pierwiastek żelazo, dowiesz się, że ma on 4 stabilne izotopy o liczbie masowej  $A = 54, 56, 57$  i  $58$  ( $^{54, 56, 57, 58}\text{Fe}$ ). Liczba atomowa żelaza wynosi 26. Stabilne izotopy tego pierwiastka mają więc kolejno 28, 30, 31 i 32 neutrony w jądrze. Jedynie stabilne izotopy najlżejszych pierwiastków mają w przybliżeniu równą liczbę protonów i neutronów w jądrze. Izotopy ulegające [przemianie beta minus](#) mają większą przewagę neutronów nad protonami niż izotopy stabilne. W przybliżeniu można powiedzieć, że im większa przewaga w liczbie neutronów nad protonami tym wartość jest  $Q_B$  większa.

Warto zadać sobie pytanie, jak energia  $Q_B$  jest rozdzielana pomiędzy produkty reakcji, czyli jądro końcowe, [cząstkę beta](#) i [antyneutrino](#). Pierwsze pomiary rozkładu energii [cząstki beta](#) pochodzą z lat 30. ubiegłego stulecia. Zauważono, że jest to rozkład ciągły, przyjmujący wartości od zera do  $Q_B$ , z jednym maksimum w okolicach energii  $Q_B/3$ . Przykładowy rozkład energii [cząstek beta](#) przedstawia Rys. 1. Wykres pochodzi z pracy Charlesa D. Ellisa i Williama A. Woostera opublikowanej w 1927 roku (Proc. Roy. Soc. **A117** (1927) 109). Uчени jako pierwsi zmierzili pełne widmo cząstki beta emitowanej w rozpadzie bizmutu o liczbie masowej 210 ( $^{210}\text{Bi}$ ). W tym czasie cząstka neutrino nie była jeszcze znana. Sądzono, że

rozpad beta jest procesem dwuciałowym, to znaczy, że jedynymi produktami reakcji jest jądro końcowe oraz elektron. Ciągły rozkład energii bety jednak temu przeczył.



Rys. 1. Rozkład energii cząstek beta emitowanych przez izotop bizmutu  $^{210}\text{Bi}$ , w oparciu o wykres z pracy Ellisa i Woostera

Aby zrozumieć tę pozorną sprzeczność, warto przypomnieć sobie zasadę zachowania energii i pędu. Zasada energii mówi, że całkowita energia układu przed reakcją jest równa całkowitej energii układu po reakcji. W naszym przypadku wyraża się ona równaniem (2). Wartość  $Q_B$  jest sumaryczną energią kinetyczną produktów (chwilowo zapominamy o energii wzbudzenia jądra, do czego jeszcze powrócimy). Zasada zachowania pędu ma podobne brzmienie do zasady zachowania energii i mówi, że pęd substratów reakcji jest równy pędowi produktów,

$$\vec{p}\left(\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix} X\right) = \vec{p}\left(\begin{smallmatrix} A \\ Z+1 \end{smallmatrix} Y\right) + \vec{p}(e^-) + \vec{p}(\bar{\nu}_e). \quad (3)$$

Należy jednak pamiętać, że pęd jest wielkością wektorową. Jeśli w chwili początkowej promieniotwórcze jądro pozostaje w spoczynku, czyli ma zerowy pęd, to cząstki po rozpadzie sumarycznie mają również zerowy pęd. (Nie oznacza to w ogólności, że cząstki pozostają w spoczynku, ale że wektory pędów dodają się do zera.)

Gdyby przemiana beta była procesem dwuciałowym, istniałaby tylko jedna kombinacja energii i pędów jądra końcowego i **cząstki beta**, które spełniałoby jednocześnie zasadę zachowania energii i pędu. Ciągły rozkład energii elektronów dowodził, że w reakcji musi być emitowane coś jeszcze. W oparciu o zebrane dane doświadczalne Pauli doszedł do wniosku, że w rozpadzie beta musi być emitowana trzecia cząstka o bardzo małej masie, obojętna elektrycznie i bardzo słabo oddziałująca z materią. Istnienie neutrin i antyneutrin zostało potwierdzone doświadczalnie w przeciągu kolejnych 20 lat.

Podsumujmy. Energia uwalniana w przemianie beta jest rozdzielana pomiędzy trzy produkty rozpadu – jądro końcowe, **cząstkę beta** i **antyneutrino** tak, aby były spełnione zasady zachowania energii i pędu. Ciągły rozkład energii **cząstki beta** dowodzi, że przemiana jest procesem trójciałowym. W oparciu o tę obserwację Wolfgang Pauli wysnuł tezę o istnieniu neutrin, lekkich, słabo oddziałujących oraz pozbawionych ładunku cząstek. Teza ta została potwierdzona doświadczalnie i dziś badanie neutrin stanowi motywację działania dużych, międzynarodowych grup badawczych.

Pozostając jeszcze przez moment w tematyce energii cząstek po rozpadzie beta warto dodać, że jądro końcowe najczęściej znajduje się w stanie wzbudzonym, czyli ma nadwyżkę energii w stosunku do stanu podstawowego. Energia ta jest zazwyczaj uwalniana w ciągu kilku nanosekund w postaci promieniowania gamma, czyli fali elektromagnetycznej o bardzo dużej częstotliwości.

Izotopem beta-promieniotwórczym, z którym mamy do czynienia najczęściej w życiu codziennym, jest potas 40 ( $^{40}\text{K}$ ). Potas jest pierwiastkiem o liczbie atomowej  $Z = 19$  i składa się w ponad 99% z dwóch stabilnych izotopów –  $^{39}\text{K}$  i  $^{41}\text{K}$ , czyli posiadających 20 i 22 neutronów w jądrze oraz w około 0,01% z posiadającego 21 neutronów promieniotwórczego potasu  $^{40}\text{K}$ . Izotop  $^{40}\text{K}$  w 90% ulega **przemianie beta minus**, prowadząc do powstania  $^{40}\text{Ca}$ , cząstki beta oraz **antyneutrino**. Jest to najbardziej rozpowszechniony na Ziemi izotop beta promieniotwórczy, szczególnie obficie występujący w bananach, pomidorach, czy ziemniakach. Źródłem promieniowania beta, z którym mamy do czynienia najczęściej, są więc banany. Czy to oznacza, że jedzenie bananów jest niebezpieczne i może mieć negatywny wpływ na zdrowie? Nie! Obecność promieniowania jonizującego w naszym otoczeniu jest całkowicie naturalna. Dawka promieniowania wynikająca ze zjedzenia jednego banana jest tak mała, że jedno prześwietlenie rentgenowskie zęba odpowiada zjedzeniu ok. 50 bananów.

## Słowniczek

### **Przemiana beta minus**

(ang. beta minus decay) – jeden z podstawowych procesów, którym ulegają niestabilne jądra atomowe. Polega na przemianie jednego neutronu w jądrze atomowym na proton, elektron, zwany cząstką beta oraz antyneutrino elektronowe. Najprostszym przykładem przemiany beta minus jest rozpad swobodnego neutronu.

### **Cząstka beta**

(ang. beta particle) – elektron wyemitowany z jądra atomowego po przemianie beta minus. Cząstki beta swoją nazwę zawdzięczają początkom badań nad promieniotwórczością (obok promieniowania alfa i gamma). Elektrony wyemitowane w przemianie beta są zazwyczaj cząstkami relatywistycznymi, czyli są rozpędzone do prędkości porównywalnych z prędkością światła w próżni.

### **Antyneutrino elektronowe**

(ang. electron anti-neutrino) - pozbawiona ładunku cząstka elementarna o bardzo małej masie. Antyneutrino bardzo słabo oddziałuje z materią, przez co jest trudne do zarejestrowania. Istnienie antyneutrino zapostulował Wolfgang Pauli, w oparciu o rozkład energii elektronów wyemitowanych w przemianie beta. Nazwa neutrino została zaproponowana przez E. Fermiego.

### **Atomowa jednostka masy**

(ang. atomic mass unit) - ozn.  $u$  - jednostka masy równa 1/12 masy atomu węgla  $^{12}\text{C}$ ,

$$1u \approx 1,66 \cdot 10^{-24} \text{g.}$$

# Grafika interaktywna

---

## Opisujemy przemianę $\beta^-$

Grafika interaktywna przedstawia przemianę beta minus jednego z izotopów beta-promieniotwórczych. Rozpoznaj cząstki występujące w grafice i określ ich nazwy, liczby masowe oraz ładunek.

**Uwaga:** nie zgadza się liczba protonów, nie wiadomo skąd mamy wiedzieć, że akurat elektron jest żółty, a antyneutrino fioletowe. Poza tym nie tylko chodzi o cząstki, ale też o jądra N i C.

### Polecenie 1

### Polecenie 2

Uzupełnij puste pola zgodnie z powyższym przykładem. Dla każdej z narysowanej cząstek podaj ładunek  $Q$  oraz liczbę masową  $A$ . Ładunki są podane w jednostce ładunku elementarnego, czyli ładunku niesionego przez proton. Wartość ładunku elementarnego wynosi  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ .

# Sprawdź się

---

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



Ćwiczenie 3



Ćwiczenie 4



Ćwiczenie 5



Ćwiczenie 6



Ćwiczenie 7



Ćwiczenie 8



# Dla nauczyciela

---

<b>Imię i nazwisko autora:</b>	Aleksandra Fijałkowska
<b>Przedmiot:</b>	Fizyka
<b>Temat zajęć:</b>	<b>Przemiana beta minus</b>
<b>Grupa docelowa:</b>	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

<p><b>Podstawa programowa:</b></p>	<p><b>Cele kształcenia – wymagania ogólne</b></p> <p>II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.</p> <p><b>Zakres podstawowy</b></p> <p><b>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</b></p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</p> <p>2) posługuje się materiałami pomocniczymi, w tym tablicami fizycznymi i chemicznymi oraz kartą wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych;</p> <p>4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem.</p> <p>XI. Fizyka jądrowa.</p> <p>Uczeń:</p> <p>3) wymienia właściwości promieniowania jądrowego; opisuje rozpady alfa, beta.</p> <p><b>Zakres rozszerzony</b></p> <p><b>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</b></p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</p> <p>2) posługuje się materiałami pomocniczymi, w tym tablicami fizycznymi i chemicznymi oraz kartą wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych;</p> <p>4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem.</p> <p>XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa.</p> <p>Uczeń:</p> <p>9) wymienia właściwości promieniowania jądrowego; opisuje rozpady alfa, beta (<math>\beta^+</math>, <math>\beta^-</math>).</p>
<p><b>Kształtowane kompetencje kluczowe:</b></p>	<p><b>Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji,</li> <li>• kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii,</li> <li>• kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.</li> </ul>

<b>Cele operacyjne:</b>	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. objaśnia, czym jest przemiana beta minus.</li> <li>2. zapisuje równanie przemiany beta.</li> <li>3. wyznacza energię uwolnioną w przemianie beta.</li> <li>4. wyszukuje na tablicy nuklidów naturalne izotopy beta promieniotwórcze.</li> </ol>
<b>Strategie nauczania:</b>	IBSE
<b>Metody nauczania:</b>	wykład informacyjny
<b>Formy zajęć:</b>	praca zespołowa
<b>Środki dydaktyczne:</b>	tablica
<b>Materiały pomocnicze:</b>	tablica nuklidów
<b>PRZEBIEG LEKCJI</b>	
<b>Faza wprowadzająca:</b>	
<p>Nauczyciel pokazuje uczniom tablicę nuklidów, wskazuje jądra stabilne po czym pokazuje obszar znajdujący się po prawej stronie od ścieżki stabilności. Nauczyciel pyta uczniów jakiej im zdaniem przemianie ulegają znajdujące się tam jądra.</p>	
<b>Faza realizacyjna:</b>	
<p>Nauczyciel wprowadza pojęcie przemiany beta, zapisuje równanie przemiany.</p> <p>Nauczyciel komentuje kolejne człony równania, w tym antyneutrino elektronowe – opowiada czym jest oraz jaka jest historia jego odkrycia.</p> <p>Nauczyciel wprowadza wzór na energię uwalnianą w przemianie beta minus.</p> <p>Uczniowie wyznaczają energię uwalnianą podczas rozpadu neutronu, zgodnie z zadaniem 8 z zestawu ćwiczeń, dla uproszczenia można przyjąć, że masa spoczynkowa elektronu wynosi <math>0,511 \text{ MeV}/c^2</math>.</p> <p>Nauczyciel ocenia pracę uczniów rozwiązujących zadanie, dając im informację zwrotną odnośnie ich wiedzy.</p>	
<b>Faza podsumowująca:</b>	
<p>Korzystając z tablicy nuklidów uczniowie wyszukują występujące naturalnie izotopy beta- promieniotwórcze.</p>	
<b>Praca domowa:</b>	
<p>Nauczyciel zadaje uczniom zadanie 4 i 6 z zestawu ćwiczeń.</p>	

**Wskazówki metodyczne  
opisujące różne  
zastosowania danego  
multimedium:**

Grafika do wykorzystania albo po lekcji w celu utrwalenia materiału, albo w czasie lekcji.