

## Opisujemy przemianę beta+

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Grafika interaktywna
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela



## Czy to nie ciekawe?

Dan Brown, jeden z najpopularniejszych pisarzy świata, fabułę swojej bestselerowej książki pt. „Anioły i demony” osadził wokół próby odnalezienia superbomby będącej skradzioną z laboratorium CERN antymaterii. Otwarcie naczynia miało prowadzić do anihilacji antymaterii, a w konsekwencji uwolnienia ogromnej ilości energii zdolnej zniszczyć Watykan. Antymateria zamknięta w próżniowym naczyniu brzmi ciekawiej i bardziej tajemniczo niż np. ciężarówka trotylu. W tym materiale odrzemy jednak powieść z tajemnicy, zajmując się najpowszechniejszym procesem, w którym powstaje antymateria, czyli przemianą beta plus.

### Twoje cele

W tym e-materiale:

- dowiesz się, czym jest przemiana beta plus,
- zrozumiesz, na czym polega różnica pomiędzy przemianą beta plus i wychwytem elektronu,
- zrozumiesz, jaki jest energetyczny warunek zajścia przemiany beta plus oraz wychwytu elektronu,

- poznasz, jakie są obserwacje świadczące o zajściu przemiany beta plus oraz wychwyty elektronu.

# Przeczytaj

---

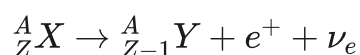
## Warto przeczytać

### Przemiana beta plus

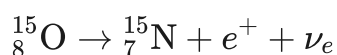
**Przemiana beta plus** polega na zmianie jednego protonu znajdującego się w jądrze atomowym w neutron, [pozyton](#) oraz [neutrino elektronowe](#).

Proces ten zachodzi w takich izotopach, dla których stosunek liczby protonów do liczby neutronów w jądrze atomowym jest większy niż analogiczny stosunek stabilnych izotopów danego pierwiastka. Takie izotopy nazywamy protononadmiarowymi.

[Przemianę beta plus](#) zapisuje się w formie następującej równości:



Przykład, przemiana  $\beta^+$  tlenu  ${}^{15}\text{O}$ :



Zgodnie z tym zapisem jądro o liczbie atomowej  $Z$  i masowej  $A$  zmienia się w jądro o zmniejszonej o 1 liczbie atomowej, czyli posiadające o jeden proton mniej. Oznacza to, że liczba neutronów wzrosła o 1. Zmianie nie uległa liczba masowa równa sumie protonów i neutronów. Ponadto w procesie emitowany jest dodatnio naładowany [pozyton](#), zwany też [antyelektronem](#) oraz [neutrino elektronowe](#). [Neutrino elektronowe](#) jest bardzo lekką, pozbawioną ładunku, prawie nieoddziałującą z materią cząstką elementarną.

Sprawdźmy, czy równanie spełnia zasadę zachowania ładunku. Z lewej strony równania mamy jądro o ładunku  $+Z$ , z prawej strony jądro o dodatnim ładunku  $(Z - 1)$ , pozyton o ładunku  $+1$  oraz obojętne elektrycznie [neutrino](#). Całkowity ładunek jest więc zachowany.

[Pozyton](#) jest cząstką przeciwną do elektronu, jego antycząstką. Spotkanie cząstki z antycząstką (np elektronu z [pozytonem](#)) powoduje ich natychmiastową anihilację, czyli destrukcję, zniknięcie. Masa cząstek zostaje zamieniona na energię niesioną przez dwa kwanty promieniowania elektromagnetycznego wyemitowane w przeciwnych kierunkach. Energię fotonów oblicza się zgodnie z równaniem Einsteina  $E = mc^2$ . Obliczmy energię wydzieloną w postaci promieniowania podczas anihilacji pary elektron-[pozyton](#). Masa spoczynkowa elektronu i [pozytonu](#) wynosi  $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg.

Przeprowadźmy te obliczenia:

$$E = 2mc^2$$

$$E = 2 \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 163,96 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

W fizyce subatomowej wygodniejszą jednostką energii jest elektronowolt (eV), przeliczmy więc wynik z dżuli na elektronowolty:

$$E = 163,96 \cdot 10^{-15} \text{ J} = \frac{163,96 \cdot 10^{-15}}{1,602 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = 1023 \cdot 10^3 \text{ eV} = 1023 \text{ keV}$$

Przyjmując nieco dokładniejszą wartość prędkości światła, otrzymalibyśmy wartość ok. 1022 keV. Tyle właśnie wynosi energia dwóch fotonów wyemitowanych po anihilacji elektronu z **pozytonem**. Każdy z nich ma więc energię 511 keV. Obecność promieniowania gamma o energii 511 keV jest dla fizyków znacznikiem zajścia **przemiany beta plus**. Dlaczego? Przecież **pozyton** jako antycząstka w naszym świecie nie może istnieć – natychmiast spotyka elektron i anihilują wysyłając kwanty o właśnie takiej energii. Dodajmy, że to jest najbardziej niezawodny sposób rozpoznania procesu  $\beta^+$ .

Energia uwolniona w reakcji równa jest różnicy mas substratów i produktów wymnożonej przez kwadrat prędkości światła. W przypadku **przemiany beta plus** energia przemiany ( $Q_\beta$ ) wyraża się wzorem:

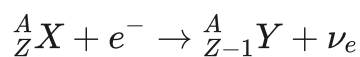
$$Q_\beta = \left( m\left({}^A_Z X\right) - m\left({}^A_{Z-1} Y\right) - 2 \cdot m_e \right) c^2$$

Małą literką  $m$  oznaczono masę atomową substratu  $m\left({}^A_Z X\right)$  i produktu  $m\left({}^A_{Z-1} Y\right)$ , literą  $m_e$  oznaczono masę elektronu i **pozytonu**, zaś literką  $c$  prędkość światła w próżni. Skąd we wzorze podwojona wartość masy elektronu? Mała litera  $m$  oznacza masę atomową, a więc masę jądra atomowego wraz z otaczającymi je elektronami. Człon  $m\left({}^A_Z X\right)$  uwzględnia masę  $Z$  elektronów, zaś człon  $m\left({}^A_{Z-1} X\right)$  masę  $Z - 1$  elektronów. Brakujący elektron oraz emitowany z jądra pozyton uwzględniony jest w ostatnim członie równania. Masa **neutrina** jest zanedbywalnie mała. Okazuje się, że aby zaszła **przemiana beta plus**, nie tylko masa początkowego atomu musi być większa od masy atomu końcowego, czyli  $m\left({}^A_Z X\right) > m\left({}^A_{Z-1} Y\right)$ . Różnica ta musi być większa przynajmniej o dwie masy elektronu. **Przemianę beta plus** nazywamy więc procesem z progiem.

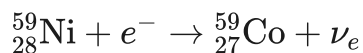
### Wychwył elektronu

Przemianą konkurującą z przemianą beta plus, którym ulegają jądra protononadmiarowe, jest **wychwył elektronu**. Proces polega na wychwycie elektronu z atomowej powłoki

elektronowej przez proton z jądra atomowego i powstaniu neutronu i [neutrina elektronowego](#). Przemianę opisuje równanie:



Przykładem procesu jest [wychwyt elektronu](#) przez jądro niklu  ${}^{59}\text{Ni}$ :



W przeciwieństwie do [przemiany beta plus](#) w [wychwycie elektronu](#) nie jest emitowany [pozyton](#) oraz powstające w wyniku jego anihilacji kwanty gamma o energii 511 keV. Jest to ponadto przemiana bezprogowa, by zaszła, wystarczy, aby masa atomu początkowego była większa od masy atomu końcowego.

Najczęściej wychwytywanymi elektronami są elektrony z powłoki K, która częściowo pokrywa jądro atomowe. Powstała dziura w zapełnieniu powłoki jest uzupełniana elektronym z wyższych powłok. Ten zaś schodząc na niższą powłokę zostaje silniej związany, a jego nadwyżka energii jest najczęściej emitowana w formie promieniowania rentgenowskiego. Energia wyemitowanego kwantu promieniowania X wynika z różnicy energii wiązania elektronu na poziomach elektronowych i charakterystyczna dla danego atomu. Pojawienie się promieniowania rentgenowskiego jest dla fizyków świadectwem zajścia procesu [wychwytu elektronu](#).

Jądro końcowe, powstałe zarówno w [przemianie beta plus](#) jak i w [procesie wychwytu neutronów](#), może być w stanie wzbudzonym, czyli posiadać nadwyżkę energii. Jądro pozbywa się tej energii najczęściej poprzez emisję jednego lub kilku kwantów promieniowania gamma. Energia wyemitowanych fotonów charakteryzuje dane jądro, umożliwiając jego identyfikację.

### **PET - pozytonowa emisyjna tomografia komputerowa**

Jednym z najpopularniejszych zastosowań rozpadu beta puls jest [pozytonowa emisyjna tomografia komputerowa](#), w skrócie PET. Jest to technika umożliwiająca otrzymanie obrazu fragmentu ludzkiego ciała, najczęściej organów lub ich zmian patologicznych, czyli guzów. Zasada działania [PET](#) polega na tym, że do ciała człowieka wprowadza się niewielką ilość promieniotwórczego izotopu ulegającego przemianie beta plus, doczepionego do substancji gromadzącej się w interesującym organie, np. chcąc wykryć obecność nowotworu wykorzystuje się glukozę z dodatkiem radioaktywnego fluoru  ${}^{18}\text{F}$ . Zmiany nowotworowe mają przyspieszony metabolizm cukrów, dlatego kumulują promieniotwórczy fluor  ${}^{18}\text{F}$ , który ulega w nich przemianie beta plus. Wyemitowany w przemianie pozyton anihiluje z elektronym, co prowadzi do powstania dwóch fotonów o energii 511 keV. Badany

pacjent jest otoczony detektorami promieniowania gamma, służącymi do jednoczesnego pomiaru obydwu wyemitowanych fotonów. Na tej podstawie odtwarza się miejsce ich emisji oraz rekonstruuje obraz interesującego fragmentu ciała.

## Słowniczek

### **Przemiana beta plus**

(ang. *Beta plus decay*) jeden z podstawowych procesów, którym ulegają niestabilne jądra atomowe. Przemiana beta plus polega na zmianie jednego protonu w jądrze atomowym na neutron, pozyton, zwany cząstką beta plus oraz neutrino elektronowe.

### **Wychwył elektronu**

(ang. *electron capture*) proces polegający na wychwycie przez proton znajdujący się w jądrze atomowym elektronu z powłoki atomowej, w wyniku czego powstaje neutron i neutrino elektronowe.

### **Pozyton (antyelektron)**

(ang. *positron*) cząstka elementarna będąca antycząstką elektronu. Jej masa jest równa masie elektronu oraz posiada dodatni ładunek równy co do wielkości ładunkowi elektronu. Po spotkaniu z elektronem ulega anihilacji, czego efektem jest powstanie dwóch kwantów promieniowania gamma o energii 511 keV.

### **Neutrino elektronowe**

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

### **PET pozytonowa emisyjna tomografia komputerowa**

(ang. *positron emission tomography*) technika obrazowania medycznego polegająca na jednoczesnej detekcji dwóch fotonów powstających po anihilacji pozytonu. Źródłem pozytonu jest przemiana beta plus radioaktywnego znacznika wprowadzonego do ciała pacjenta.

# Grafika interaktywna

---

## Opisujemy przemianę beta +

Grafika interaktywna przedstawia schemat układu detekcyjnego służącego do pomiaru przemiany beta radioaktywnej próbki oraz schematy rozpadów dwóch izotopów  $^{22}\text{Na}$  oraz  $^{26}\text{Al}$  i otrzymane wyniki pomiaru.

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

### Polecenie 1

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

### Polecenie 2

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

# 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 plus</b>
<b>Grupa docelowa:</b>	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony
<b>Podstawa programowa:</b>	<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>4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;</p> <p>15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu.</p> <p>XI. Fizyka jądrowa. 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>4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;</p> <p>19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu.</p> <p>XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń:</p> <p>9) wymienia właściwości promieniowania jądrowego; opisuje rozpady alfa, beta (<math>\beta^+</math>, <math>\beta^-</math>).</p>

<p><b>Kształowane 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> <li>• kompetencje cyfrowe.</li> </ul>
<p><b>Cele operacyjne:</b></p>	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. dowiaduje się czym jest przemiana beta plus;</li> <li>2. zapisuje równanie przemiany plus;</li> <li>3. wyznacza warunek energetyczny zajścia przemiany beta plus;</li> <li>4. poznaje proces wychwytu elektronu;</li> <li>5. zapisuje równanie procesu wychwytu elektronu oraz energetyczny warunek jej zajścia.</li> </ol>
<p><b>Strategie nauczania:</b></p>	<p>IBSE</p>
<p><b>Metody nauczania:</b></p>	<p>wykład informacyjny</p>
<p><b>Formy zajęć:</b></p>	<p>praca zespołowa, praca indywidualna</p>
<p><b>Środki dydaktyczne:</b></p>	<p>tablica</p>
<p><b>Materiały pomocnicze:</b></p>	<p>tablica nuklidów</p>
<p><b>PRZEBIEG LEKCJI</b></p>	
<p><b>Faza wprowadzająca:</b></p>	
<p>Nauczyciel zaciekawia uczniów wpytujac ich o skojarzenia związane ze slowem antymateria i ewentualne zrodla antymaterii.  Nauczyciel rozpoznaje stan wiedzy uczniow wpytujac o radioaktywnosc i znane przemiany jadowe.  Nauczyciel precyzuje temat lekcji.</p>	
<p><b>Faza realizacyjna:</b></p>	

Nauczyciel wprowadza pojęcie przemiany beta plus i zapisuje równanie przemiany. Nauczyciel komentuje kolejne człony równania, w tym pozyton, zwany też antyelektronem oraz neutrino elektronowe. Nauczyciel wprowadza pojęcie anihilacji pozytonu z elektronem oraz poleca uczniom znalezienie energii fotonów emitowanych w tym procesie. Nauczyciel podaje wartość masy spoczynkowej elektronu oraz prędkości światła. Nauczyciel wprowadza wzór określający warunek energetyczny przemiany beta plus. Nauczyciel wprowadza drugi typ przemiany - wychwytywanie elektronu oraz zapisuje jej równanie i warunek zajścia.

**Faza podsumowująca:**

Uczniowie rozwiązują zadania 1, 2, 3 i 7 z zestawu ćwiczeń. Nauczyciel sprawdza zrozumienie materiału sprawdzając poprawność rozwiązywanych zadań. Nauczyciel ocenia pracę uczniów rozwiązujących zadanie, dając im informację zwrotną odnośnie ich wiedzy.

**Praca domowa:**

Nauczyciel poleca uczniom zapoznanie się z zasadą działania pozytonowej tomografii komputerowej (PET).

**Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium**

Multimedium może być wykorzystane do poszerzenia wiedzy oraz utrwalenia materiału po lekcji.