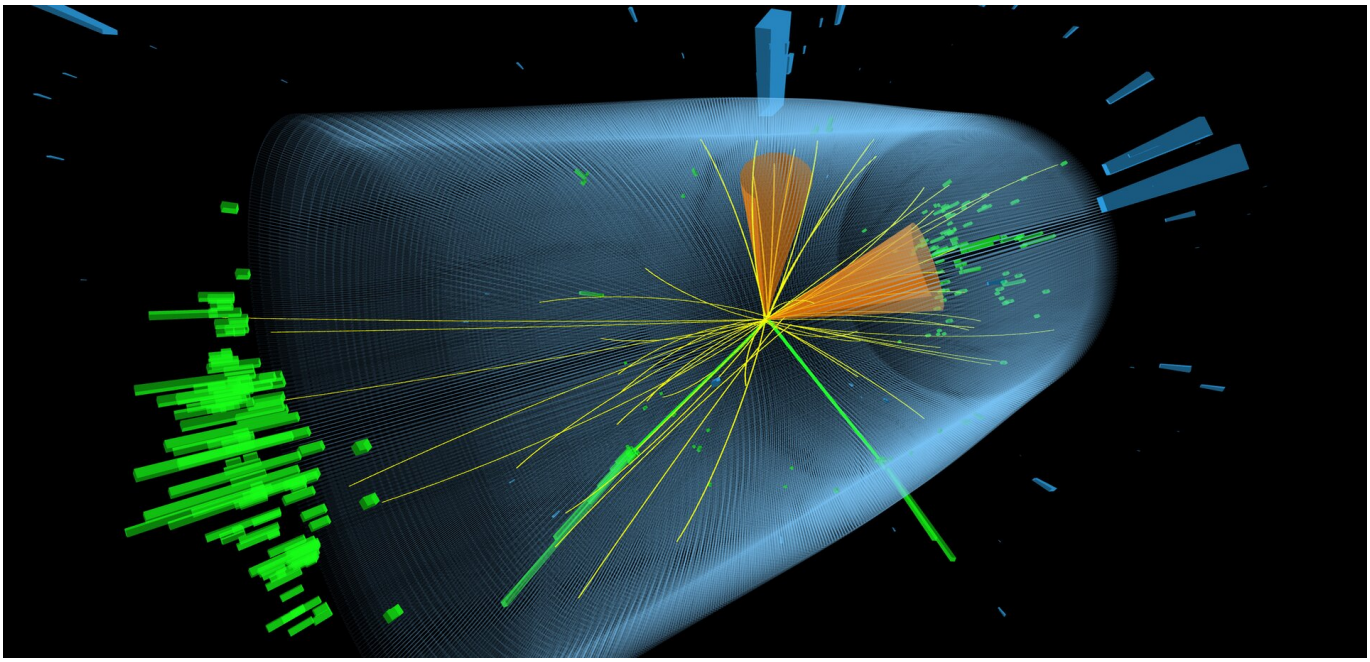
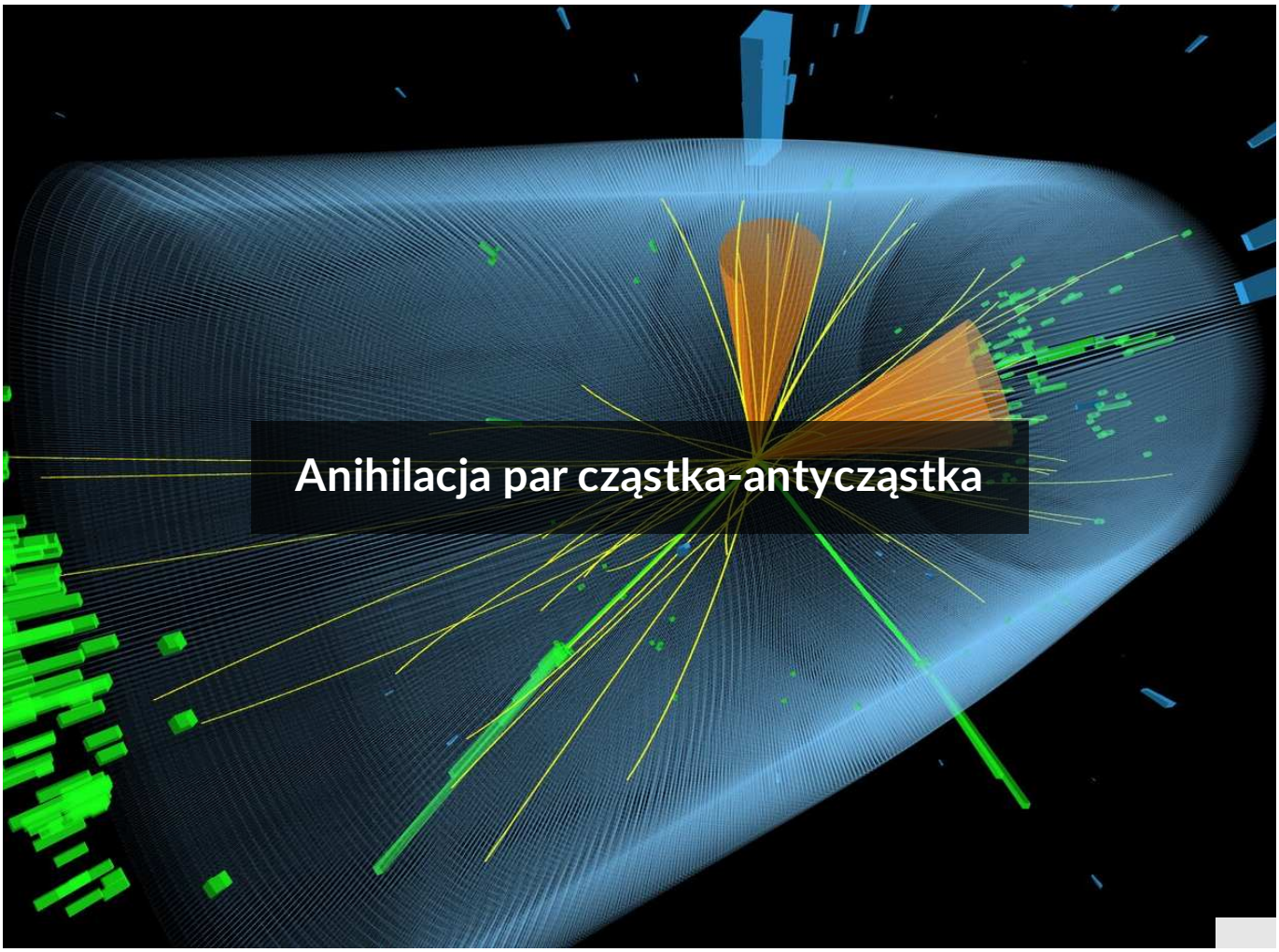


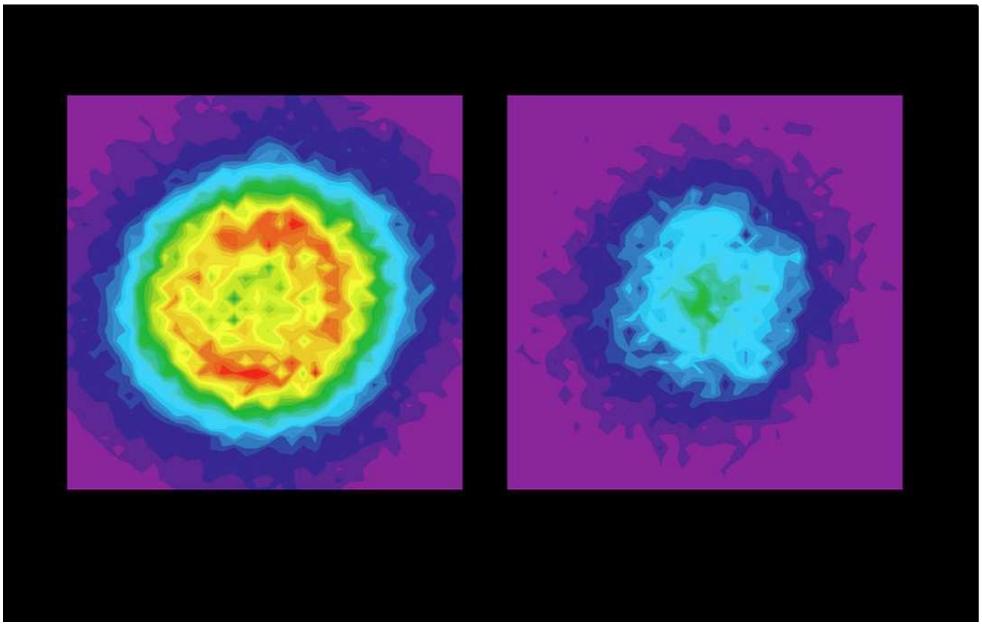
Anihilacja par cząstka-antycząstka

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Animacja 3D
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela



Czy to nie ciekawe?

Anihilacja to najbardziej wydajne ze znanych źródeł energii (Rys. a.). Zjawisko to zachodzi, gdy materia spotyka się z antymaterią. Materia i antymateria w wyniku anihilacji znikają, a cała ich energia spoczynkowa $E = mc^2$ zamienia się w energię promieniowania elektromagnetycznego. We wzorze Einsteina występuje kwadrat prędkości światła, czyli aby obliczyć wyzwoloną w anihilacji energię w jednostkach układu SI, trzeba masę w kilogramach pomnożyć przez czynnik $9 \cdot 10^{16}$. Jeśli anihiluje 1 kg materii i antymaterii, w jednej chwili powstanie promieniowanie o energii $9 \cdot 10^{16}$ J (podczas, gdy produkcja energii elektrycznej na świecie w 2018r. to $9{,}6 \cdot 10^{19}$ J). Na szczęście antymateria nie występuje we Wszechświecie w znaczących ilościach. Pojawiają się jedynie pojedyncze antycząstki, tworzące się w zderzeniach między cząstkami o bardzo wysokich energiach. Kreacja pary cząstka – antycząstka towarzyszy również oddziaływaniu wysokoenergetycznych fotonów z materią. Więcej o anihilacji par cząstka – antycząstka dowiesz się z tego e-materiału.



Rys. a. Obraz anihilacji cząstek. Zdjęcie pochodzi z biblioteki naukowej w Cernie, dodane w październiku 2018r.

Twoje cele

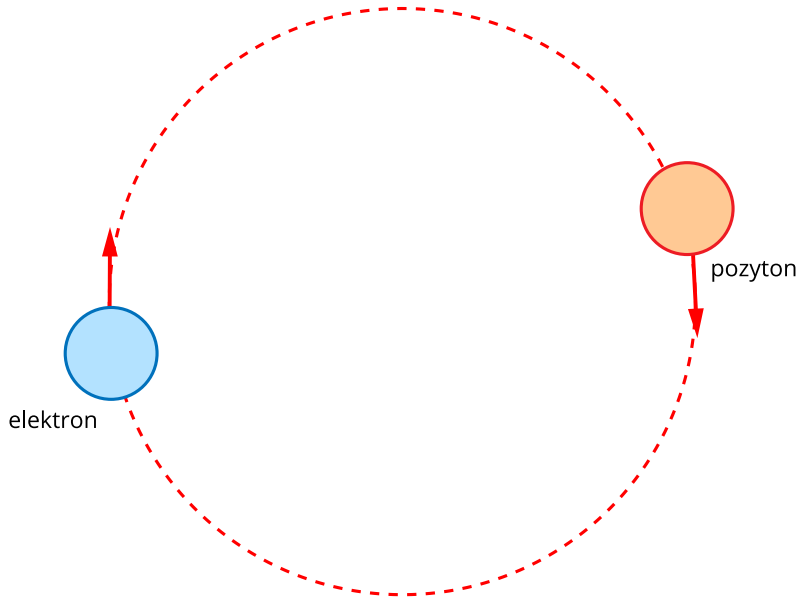
- Dowiesz się, czym jest antymateria.
- Poznasz właściwości pozytonu.
- Zrozumiesz, na czym polega proces anihilacji par elektron – pozyton.
- Przeanalizujesz zachowanie energii, pędu i ładunku w procesie anihilacji.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Anihilacja to zjawisko zachodzące, gdy materia spotyka się z antymaterią. Materia i antymateria w wyniku anihilacji znikają, a cała ich energia spoczynkowa $E = mc^2$ zamienia się w energię promieniowania elektromagnetycznego. Czym jest antymateria? Każda cząstka elementarna posiada swoją antycząstkę, która ma taką samą masę, a przeciwny ładunek. Antycząstką elektronu jest pozyton, który ma masę identyczną z masą elektronu. Ładunki elektronu i pozytonu mają taka samą wartość e (ładunek elementarny) są jednak przeciwnych znaków. Ładunek elektronu jest ujemny, $-e$, a pozytonu dodatni, $+e$.

Pozytony mogą pojawiać się na skutek rozpadów promieniotwórczych (przemiana β^+). Jeśli przez materię przechodzą fotony gamma o odpowiednio dużej energii, może zajść zjawisko kreacji par elektron – pozyton. Polega to na tym, że foton znika, a cała jego energia zamienia się na energię spoczynkową i kinetyczną dwóch cząstek – elektronu i pozytonu. Gdy pozyton znajdzie się w otoczeniu atomów, dość szybko natrafi na elektron. Zauważmy, że pozyton i elektron o przeciwnych ładunkach przyciągają się siłami elektrycznymi. Para przyciągających się cząstek na krótki czas, rzędu 10^{-7} s, tworzy układ zwany pozytonium (Rys. 1.). Elektron i pozyton poruszają się wokół wspólnego środka masy, zbliżając się do siebie, a następnie ulegają anihilacji (dalej w tym materiale obejrzysz stosowną animację). Siła przyciągająca między nimi i jednakowa masa sprawiają, że cząstki zbliżają się do siebie z jednakowymi, co do wartości, pędami, ale przeciwnie skierowanymi. Całkowity pęd układu cząstek jest więc równy zeru.



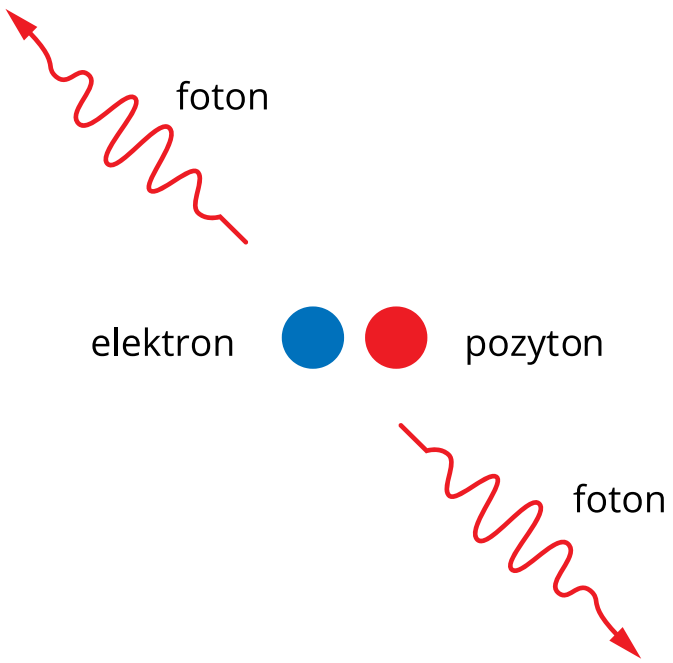
Rys. 1. Pozytonium

Zasada zachowania pędu mówi, że całkowity pęd izolowanego układu zawsze pozostaje stały. W wyniku anihilacji nie może powstać pojedynczy foton, bo każdy foton unosi pęd:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

gdzie ν jest częstotliwością fali, λ – długością fali, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s – prędkością światła, h – stałą Plancka, $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J·s lub $4{,}14 \cdot 10^{-15}$eV·s.

Aby całkowity pęd po anihilacji pozostał równy zeru, muszą powstać dwa fotony o pędach o równej wartości i przeciwnie skierowanych do siebie (Rys. 2.). Kierunki emisji fotonów są przypadkowe, ale zawsze kąt między kierunkami emisji cząstek wynosi 180°.



Rys. 2. W zjawisku anihilacji powstają dwa fotony o pędach o równej wartości i przeciwnie skierowane do siebie

Energia fotonu wyraża się wzorem:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = pc$$

Skoro wartości pędów fotonów są jednakowe, równe muszą być ich energie.

Obliczmy energie fotonów powstałych w wyniku anihilacji pary elektron – pozyton. Skorzystamy z **zasady zachowania energii**. Energia spoczynkowa elektronu, a także pozytonu wynosi 0,51 MeV. Zakładając, że przed anihilacją elektron i pozyton są w spoczynku, całkowita energia, która zamienia się na energię promieniowania wynosi 2·0,51 MeV = 1,02 MeV. Energia ta rozdzielona jest równo między dwa fotony. Każdy z nich unosi energie równą 0,51 MeV. Jeśli elektron i pozyton mają energię kinetyczną większą od zera, energia fotonów gamma powstałych podczas anihilacji ma nieco większą wartość.

Jednak energia kinetyczna elektronu i pozytonu jest znacznie mniejsza niż ich energia spoczynkowa i można ją pominąć.

Przykład 1

W fizyce jądrowej i fizyce cząstek elementarnych mówimy w skrócie, że masa elektronu wynosi 0,511 MeV. W podobny sposób wyrażamy masy innych cząstek, w jednostkach energii. Takie postępowanie jest tylko wtedy w pełni poprawne, gdy stosujemy odpowiedni układ jednostek, w którym prędkość światła traktujemy jako bezwymiarowy wzorzec prędkości. Inne prędkości wyrażamy jako ułamek prędkości światła, której wartość c jest wtedy równa 1. Fizycy często używają takiego układu jednostek; w układzie tym masa, pęd i energia mają jednakowe jednostki - dżule lub elektronowolty. Piszemy przykładowo, że m_e=0,511 MeV. Należy jednak pamiętać, że układ jednostek SI obliguje nas do zapisu: m_e=0,511 MeV/c^2 (lub $m_e=9{,}1\cdot10^{-31}$kg). Rozważmy przykład: masa elektronu wynosi $m_e=9{,}1\cdot10^{-31}$kg. Ile będzie równa odpowiadająca tej masie energia spoczynkowa E_{0e}? Korzystamy z następującego wzoru: $E_{0e}=9{,}1\cdot10^{-31}\cdot(3\cdot10^8)^2\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2=81{,}9\cdot10^{-15}$J. Pamiętając, że $1\text{eV}=1{,}602\cdot10^{-19}$J, otrzymujemy: $E_{0e}=(81{,}9\cdot10^{-15}\text{J})/(1{,}602\cdot10^{-19}\text{J/eV})=5{,}11\cdot10^5\text{eV}=0{,}511$ MeV Energia spoczynkowa elektronu wynosi wiec 0,511 MeV.

W zjawisku anihilacji również **całkowity ładunek elektryczny jest zachowany**. Przed anihilacją elektron posiada ładunek -*e*, a pozyton ładunek +*e*. Suma ładunków wynosi więc zero. Podczas anihilacji powstają dwa fotony o zerowym ładunku, więc i po anihilacji całkowity ładunek też jest zerowy.

Słowniczek

Antymateria

(ang. *antimatter*) układ antycząstek, czyli cząstek elementarnych podobnych do występujących w „zwykłej" materii, ale o przeciwnym znaku ładunku elektrycznego oraz wszystkich addytywnych liczb kwantowych.

Pozyton

(ang. *positron*) elementarna cząstka antymaterii oznaczana symbolem e^+, będąca antycząstką elektronu. Istnienie pozytonu zostało przewidziane teoretycznie w roku 1928 przez Paula Diraca. Po raz pierwszy zaobserwowany został w komorze mgłowej cztery lata później w roku 1932 przez Carla Andersona. Dirac interpretował pozyton jako dziurę w tzw. morzu Diraca, z kolei Richard Feynman rozważał go jako cząstkę poruszającą się do tyłu w czasie. Po odkryciu pozytonu m.in. małżonkowie Joliot-Curie zaobserwowali tworzenie się pozytonium, czyli stanu związanego e^+e^-.

Elektronowolt (eV)

(ang. *electronvolt*) – jednostka energii spoza układu SI używana w fizyce mikroświata. 1 eV to energia, jaką uzyskuje elektron przyspieszany w polu elektrycznym o różnicy potencjałów równej 1 wolt. 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.

Animacja 3D

Anihilacja par cząstka - antycząstka

Obejrzyj animację, która pomoże Ci wyobrazić sobie co dzieje się podczas anihilacji. Zwróć uwagę na to, co dzieje się podczas emisji kwantów gamma.

Film dostępny na portalu epodreczniki.pl

Wysłuchaj nagrania i przeczytaj opis animacji:
Animacja przedstawia anihilację elektronu i pozytonu. Na początku animacja zawiera dwa slajdy. Pierwszy to czarny slajd tytułowy, na którym po środku umieszczono, dużymi literami, biały napis "ANIHILACJA PAR CZĄSTKA - ANTYCZĄSTKA". Drugi czarny slajd pokazuje wygląd i przedstawia opis cząstek, których interakcję obejrzymy za chwilę na filmie animowanym. Po prawej stronie ekranu w postaci zielonej kulki mamy cząstkę podpisaną pod spodem małymi białymi literami jako elektron. Po lewej stronie ekranu w postaci kulki żółtej mamy antycząstkę podpisaną małymi białymi literami jako pozyton. Pod pozytonem umieszczono napis uściślający składający się z białych małych liter treści: "masa taka sama jak elektron ładunek przeciwnego znaku". Po tym slajdzie rozpoczyna się film animowany z czarnym tłem, na którym cząstki, w postaci opisanych wcześniej kulek, krążą wokół środka ekranu po przeciwnych jego stronach, coraz bliżej siebie. Gdy cząstki zetkną się ze sobą następuje ich anihilacja co na filmie przedstawiono zastępując cząstki dwoma fotonami reprezentowanymi przez żółte falki. Fotony poruszają się od środka ekranu w przeciwnych do siebie kierunkach. Następnie zderzenie cząstek powtórzono uzyskując z nich ponownie dwa fotony lecące od środka ekranu w innych kierunkach niż poprzednio ale w dalszym ciągu w kierunkach przeciwnych do siebie nawzajem. Animację kończy biały, cieniowany na dole, slajd końcowy, w którego środku umieszczono logo projektu, składające się z niebieskich, zamalowanych w środku, obiektów przypominających elipsy rozmieszczonych na powierzchni przypominającej fragment koła. Logo to również zawiera niebieski napis zapisany dużymi literami o treści "FIZYKA 950 KAPSUŁEK". Na dole ekranu umieszczono dodatkowe trzy loga w poziomie obok siebie. Są to kolejno od lewej: logo w postaci prostokąta w którym zawarto dwie umieszczone pod sobą identyczne gasnące fale, z czarnym napisem po prawej stronie którego wyrazy

rozpoczynają się z dużych liter "Wydział Fizyki" a pod nim mniejszą czarną czcionką dużymi literami tekst "POLITECHNIKA WARSZAWSKA", logo składające się z trzech pięcioramiennych gwiazdek w kolorach żółtym, białym i czerwonym na granatowym tle,po którego prawej stronie znajduje się czarny napis, którego wyrazy rozpoczynają się z dużych liter, treści: "Fundusze Europejskie Wiedza Edukacja Rozwój" oraz logo składające się z granatowej flagi ze złotymi dwunastoma gwiazdami ułożonymi w kształt okręgu z czarnym napisem po lewej stronie, którego wyrazy rozpoczynają się z dużych liter, treści "Unia Europejska".

Polecenie 1

Korzystając z zasady zachowania pędu i energii wykaż, że energie fotonów powstałych w procesie anihilacji są jednakowe.

Polecenie 2

Korzystając z zasady zachowania pędu i energii oblicz te energie, zakładając, że elektron i pozyton w chwili spotkania były w spoczynku.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:

Ćwiczenie 1

Wybierz wszystkie poprawne stwierdzenia:

- [ ] W procesie anihilacji pary elektron – pozyton powstają dwa fotony, których całkowita energia jest dwa razy większa niż energia spoczynkowa elektronu.
- [ ] W procesie anihilacji pary elektron – pozyton powstają dwa fotony o pędach o równej wartości i przeciwnie skierowanych.
- [ ] W procesie anihilacji pary elektron – pozyton powstaje foton o energii dwa razy większej niż energia spoczynkowa elektronu.
- [ ] W procesie anihilacji pary elektron – pozyton powstają dwa fotony poruszające się w przeciwnych kierunkach.

Ćwiczenie 2

Uzupełnij zdanie:

Podczas anihilacji pary elektron – pozyton nie może powstać jeden foton, gdyż nie spełniona byłaby zasada zachowania (pędu ☐ / energii ☐ / ładunku ☐).

Ćwiczenie 3

Oblicz częstotliwość promieniowania gamma, które powstało w wyniku anihilacji elektronu i pozytonu. Stała Plancka wynosi h = 4,14 · 10^{-15} eV·s. Wynik podaj z dokładnością do trzech cyfr znaczących.

Odpowiedź: ν = [ ] · 10 [ ] Hz.

Ćwiczenie 4

Wyobraź sobie, że odkryłeś źródło antymaterii i znalazłeś metodę zamiany energii powstałej podczas anihilacji w energię elektryczną. Ile zarobisz, gdy poddasz anihilacji 1 kg materii i 1 kg antymaterii? 1 kWh energii elektrycznej kosztuje 0,60 zł. Prędkość światła wynosi c = 3 · 10^{8} m/s.

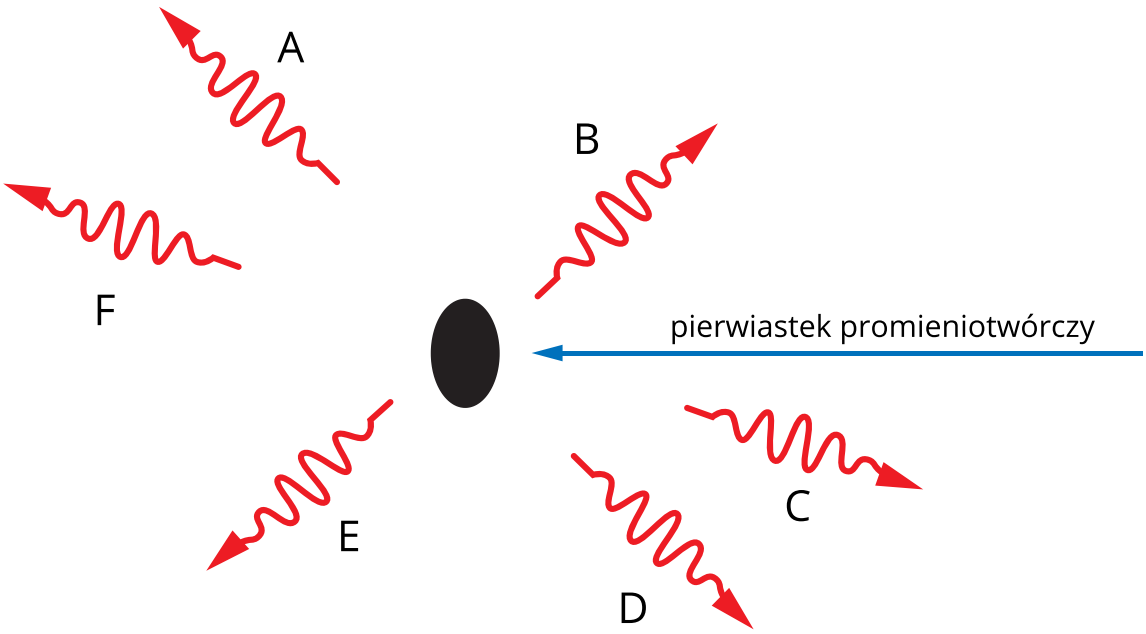
Odpowiedź: Zarobek wyniesie [ ] miliardów zł.

Ćwiczenie 5

Ile kilogramów materii i antymaterii trzeba by anihilować, aby zasilać Polskę przez rok w energię elektryczną. Roczne zużycie energii elektrycznej w Polsce wynosi około 170 TWh. Prędkość światła wynosi c = 3 · 10^{8} m/s.

Odpowiedź: Potrzeba łącznie [ ] kg, czyli [ ] kg materii i [ ] kg antymaterii

Ćwiczenie 6

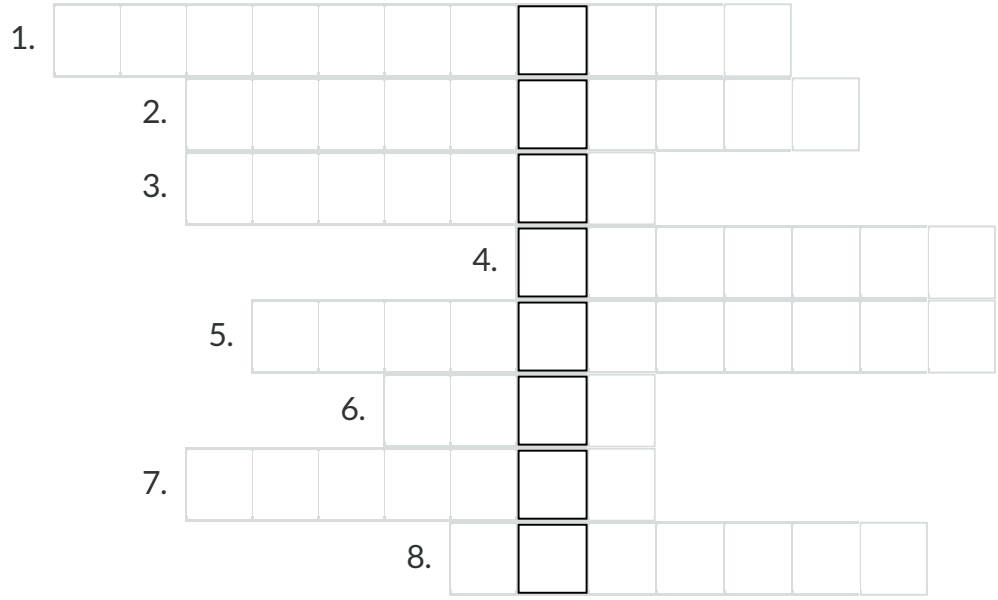


Jądra pierwiastka promieniotwórczego emitują pozytony (rozpad beta plus). Pozytony ulegają anihilacji z napotkanymi elektronami, w wyniku czego ze źródła promieniotwórczego wylatują fotony gamma. Dobierz fotony w pary, które pochodzą z jednego aktu anihilacji.

B	D
C	E
A	F

Ćwiczenie 7

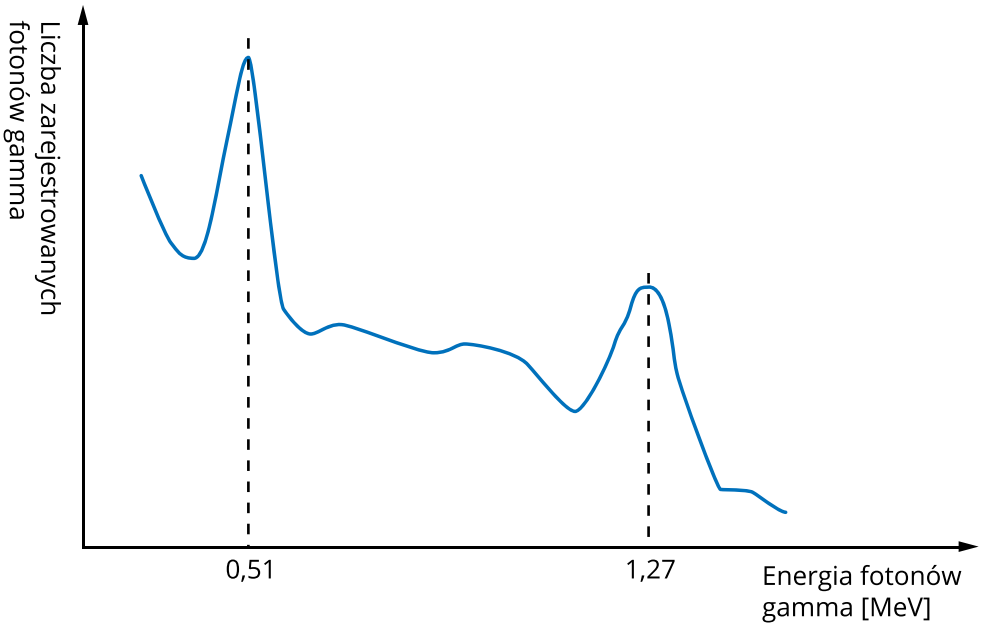
Rozwiąż krzyżówkę, aby poznać antycząstkę pozytonu:



1. Ulega anihilacji po spotkaniu z materią.
2. Proces przeciwny do kreacji par.
3. Wielkość zachowana podczas anihilacji.
4. Zjawisko, w którym powstaje para elektron – pozyton.
5. Oddziaływanie między elektronem i pozytonem.
6. Anihilacji ulega … cząstek elektron -pozyton.
7. Cząstka elementarna o masie, takiej jak elektron i o ładunku, takim jak proton.
8. 0,51 MeV to … fotonu, który powstał podczas anihilacji.

Ćwiczenie 8

Jądro izotopu sodu ^{23}Na rozpada się przez rozpad β^+ emitując pozyton e^+. Następnie jądro pozbywa się nadmiaru energii, emitując kwant gamma o energii 1,27 MeV. Zarejestrowano fotony gamma emitowane przez próbkę ^{23}Na i uzyskano widmo tych fotonów, pokazane na ilustracji. Widoczne jest maksimum dla energii 1,27 MeV, charakterystycznej dla jądra ^{23}Na, oraz drugie maksimum dla energii 0,51 MeV. Wyjaśnij pochodzenie fotonów o energii 0,51 MeV.



Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Krystyna Wosińska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**Anihilacja par cząstka - antycząstka**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa:	**Cele kształcenia – wymagania ogólne:** I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości. 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: 19) opisuje kreację lub anihilację par cząstka-antycząstka; stosuje zasady zachowania energii i pędu oraz zasadę zachowania ładunku do analizy kreacji lub anihilacji pary elektron-pozyton.
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. opisuje, czym jest antymateria; 2. wymienia właściwości pozytonu; 3. wyjaśnia, na czym polega proces anihilacji par elektron – pozyton; 4. analizuje zachowanie energii, pędu i ładunku w procesie anihilacji.
Strategie nauczania:	strategia eksperymentalno-obserwacyjna (dostrzeganie i definiowanie problemów)
Metody nauczania:	wykład informacyjny, pokaz multimedialny, analiza pomysłów
Formy zajęć:	praca w grupach, praca indywidualna
Środki dydaktyczne:	komputer z rzutnikiem lub tablety do dyspozycji każdego ucznia
Materiały pomocnicze:	e-materiał: „Kreacja par cząstka-antycząstka", „Zastosowanie zasad zachowania energii i pędu oraz zasady zachowania ładunku do analizy kreacji lub anihilacji pary elektron-pozyton"
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Wprowadzenie zgodnie z treścią w części pierwszej „Czy to nie ciekawe?". Odwołanie do wiedzy uczniów o równoważności masy i energii.	
Faza realizacyjna:	
Nauczyciel wyjaśnia, czym jest antymateria i omawia właściwości pozytonu – antycząstki elektronu. Tłumaczy, że anihilacja polega na przemianie cząstki i antycząstki na promieniowanie gamma. Uczniowie uzasadniają, że zachowany jest ładunek elektryczny w tym procesie. Następnie uczniowie w dyskusji analizują zasadę zachowania pędu podczas anihilacji elektronu i pozytonu, pozostających w spoczynku i dochodzą do wniosku, że po anihilacji pojawiają się dwa fotony gamma lecące w przeciwne strony z jednakowymi co do wartości pędami. Uczniowie oglądają animację, a następnie w grupach z pomocą nauczyciela wyznaczają wartość energii fotonów powstałych podczas anihilacji elektronu i pozytonu.	
Faza podsumowująca:	

Uczniowie w grupach rozwiązują zadanie 8 z zestawu ćwiczeń i następnie dyskutują wyniki na forum klasy. Uczniowie odnoszą się do postawionych sobie celów lekcji, ustalają które osiągnęli a które wymagają jeszcze pracy, jakiej i kiedy. W razie potrzeby nauczyciel dostarcza im informację zwrotną kształtującą.	
Praca domowa:	
Uczniowie utrwalają wiedzę i zdobyte umiejętności przez rozwiązanie w domu zadań: 1 - 4 obowiązkowo i do wyboru jedno z pozostałych zadań z zestawu ćwiczeń.	
Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:	Multimedium bazowe może też być wykorzystane przez uczniów po lekcji do powtórzenia i utrwalenia materiału. Zadania z zestawu ćwiczeń można potraktować jako zadania domowe lub niektóre z nich rozwiązać na lekcji.