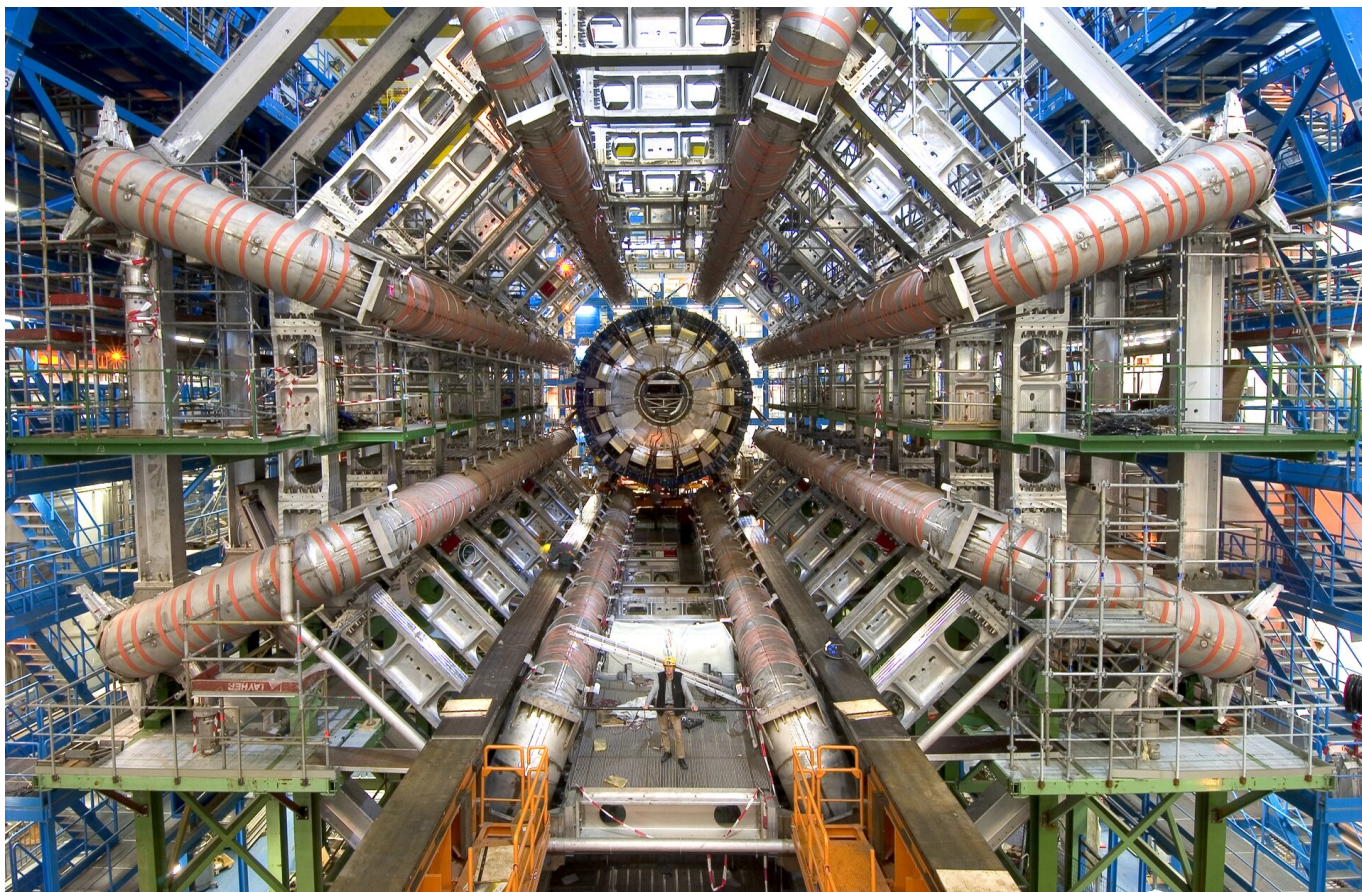




Z jakich kwarków składa się proton, a z jakich neutron?

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Animacja 3D](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



0884 Z jakich kwarków składa się proton, a z jakich neutron?

Zderzacz hadronów. Źródło CERN

Czy to nie ciekawe?

Proton i neutron to składniki wszystkich jąder atomowych we Wszechświecie. Obie cząstki mają podobne rozmiary i masy oraz podobną strukturę. W ich skład wchodzi trzy kwarki. Proton składa się z dwóch kwarków górnych i jednego dolnego, neutron z dwóch kwarków dolnych i jednego górnego. Cząstki te różnią się zatem jednym kwarkiem. Ta z pozoru drobna różnica w budowie protonu i neutronu ma ogromne konsekwencje - to z jej powodu proton jest cząstką dodatnio naładowaną, a neutron jest elektrycznie obojętny. Również z tej jednej różnicy wynika, że na zewnątrz jądra atomowego proton jest cząstką stabilną, a neutron ulega przemianie średnio po czasie około 15 minut.

Twoje cele

W tym e-materiale:

- dowiesz się, jakie są cechy wspólne protonu i neutronu,
- poznasz kwarkową strukturę nukleonów,
- zrozumiesz, dlaczego proton ma dodatni ładunek elektryczny, a neutron jest cząstką obojętną,
- oszacujesz masy konstytuentne kwarków u i d ,
- poznasz i ocenisz argumenty za stabilnością protonu,

- zrozumiesz, dlaczego neutron jest cząstką niestabilną.

Przeczytaj

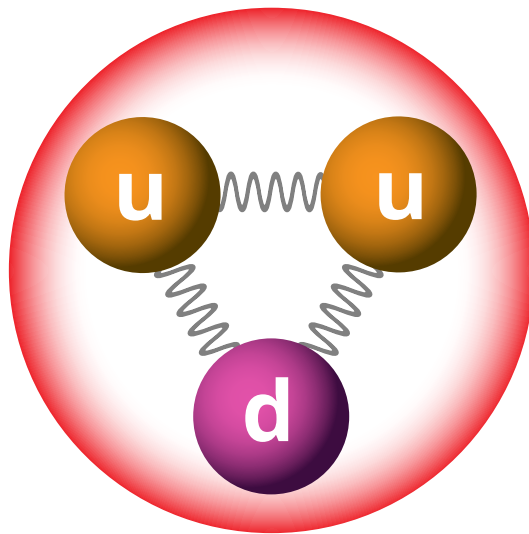
Warto przeczytać

Proton (oznaczany p) i neutron (n) to cząstki elementarne nazywane **nukleonami**. Cząstki te wchodziły w skład wszystkich jąder atomowych we Wszechświecie i mają ze sobą wiele wspólnego. Rozmiary obu cząstek są rzędu **1 fm** (czyt. femtometra), czyli 10^{-15} m. Ich masy spoczynkowe są do siebie zbliżone i wynoszą: $938,272 \text{ MeV}/c^2$ dla protonu i $939,565 \text{ MeV}/c^2$ dla neutronu. Jednostka MeV/c^2 (czyt. megaelektronowolt na c^2) to jednostka masy używana w fizyce subatomowej równa $1,783 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$. Proton i neutron różnią się natomiast ładunkiem elektrycznym. Neutron jest cząstką obojętną elektrycznie, natomiast proton ma ładunek dodatni, $+1e$, gdzie e oznacza ładunek elementarny, równy co do wartości bezwzględnej ładunkowi pojedynczego elektronu. Na zewnątrz jądra atomowego neutron ulega przemianie średnio po czasie 14 minut i 42 sekund, natomiast proton jest uważany za cząstkę stabilną. Dotychczas nie zaobserwowano ani jednej przemiany swobodnego protonu.

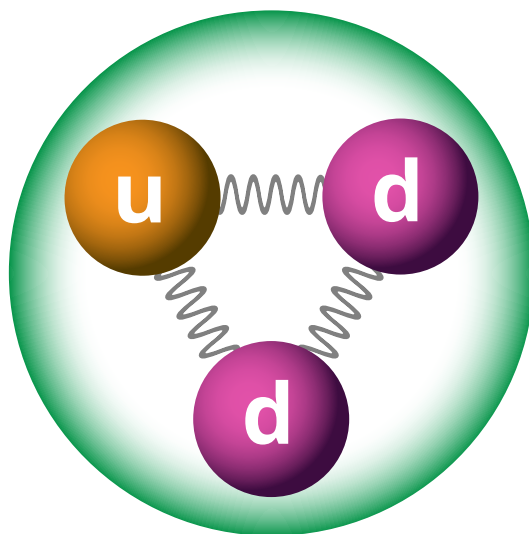
Eksperymenty, w których odkryto proton, zostały wykonane pod koniec drugiej dekady XX wieku przez Ernesta Rutherforda, odkrywcę jądra atomowego. Neutron został odkryty kilkanaście lat później, w roku 1932, przez Jamesa Chadwicka. Do momentu odkrycia neutronu nie było wiadomo jak zbudowane są jądra atomowe, istniało kilka hipotez. Chadwick nie tylko odkrył neutron, ale również pokazał, że jego masa jest zbliżona do masy protonu. Odkrycie neutronu zapoczątkowało serię przełomowych eksperymentów i jest uważane za początek odrębnej dziedziny fizyki – fizyki jądrowej. Nazwy proton i neutron zostały zaczerpnięte z greki i łaciny od słów oznaczających pierwszy i neutralny. Obie nazwy zostały zaproponowane przez Ernesta Rutherforda. Więcej na temat tego wybitnego fizyka i eksperymentów, w których odkrył jądro atomowe możesz przeczytać w e-materiale „Jak definiujemy jądro atomowe?”.

Przez wiele lat nukleony były uważane za cząstki fundamentalne, czyli pozbawione wewnętrznej struktury. Późniejsze eksperymenty pokazały jednak, że neutron i proton zbudowane są z bardziej podstawowych cząstek, nazwanych **kwarkami**. Proton i neutron mają podobną strukturę. Obie cząstki składają się z trzech kwarków, które wzajemnie na siebie oddziałują. Znanych jest 6 różnych **kwarków**, jednak do budowy protonu i neutronu wystarczą tylko dwa z nich: kwark górny o symbolu u i kwark dolny o symbolu d . Proton zbudowany jest z dwóch kwarków u i jednego d , co zapisujemy jako uud . Natomiast w skład neutronu wchodzi jeden kwark u i dwa d , co zapisujemy jako udd . Aby łatwiej wyobrazić sobie budowę **nukleonów**, możemy posłużyć się bardzo uproszczonym schematem pokazanym na Rys. 1a. i 1b.. Trzy kwarki, budujące nukleon, są rozmieszczone w taki sposób, że każdy z nich oddziałuje z dwoma pozostałymi, co na rysunku przedstawiono w postaci sprężynek. Takie ułożenie można uzyskać, wyobrażając sobie, że kwarki znajdują się

w wierzchołkach trójkąta równobocznego. W rzeczywistości struktura nukleonów jest dużo bardziej skomplikowana z racji występujących między kwarkami oddziaływań silnych.



Rys. 1a. Schemat budowy kwarkowej protonu



Rys. 1b. Schemat budowy kwarkowej neutronu

Według klasyfikacji cząstek elementarnych proton i neutron zaliczają się do grupy **barionów**, czyli cząstek zbudowanych z trzech kwarków. Kwarki mają wiele zaskakujących cech. Między innymi nie występują swobodnie jako samodzielne obiekty (zawsze występują w grupach) oraz obdarzone są ułamkowymi ładunkami elektrycznymi. Ładunek kwarka u to $+2/3e$, a kwarka d to $-1/3e$. Złożone cząstki elementarne zbudowane są w taki sposób, że sumaryczny ładunek elektryczny kwarków je tworzących jest wielokrotnością ładunku elementarnego, albo wynosi zero. Wykonując prosty rachunek, można sprawdzić, że sumaryczne ładunki elektryczne grup kwarków uud i udd są zgodne z ładunkami protonu

i neutronu. Dla przykładu: sumaryczny ładunek elektryczny kwarka u i dwóch kwarków d , czyli $+2/3e - 1/3e - 1/3e$, wynosi zero. Więcej na temat kwarków możesz dowiedzieć się w e-materiale „Górny, dolny, dziwny i powabny, czyli o kwarkach”.

Kwarkowa budowa protonu i neutronu ma również wpływ na ich stabilność. Większość znanych cząstek złożonych jest niestabilna, tzn., że po pewnym czasie od momentu powstania ulega przemianie na obiekty o mniejszych masach. Średni czas, jaki upływa od momentu powstania cząstki do momentu jej rozpadu nazywamy czasem życia. Grupa kwarków uud tworząca proton jest najlżejszą z możliwych kombinacji trzech kwarków. Proton jest zatem najlżejszym ze wszystkich **barionów**. Oznacza to, że nie ma żadnego barionu, który mógłby powstać w wyniku jego rozpadu. W konsekwencji proton nie ulega rozpadowi i może występować jako samodzielna cząstka, tj. swobodnie poza jądrem atomowym. Neutron różni się od protonu jednym kwarkiem. Zamiast jednego z dwóch kwarków u występuje kwark d , którego masa jest większa od masy kwarka górnego. W rezultacie masa neutronu jest o około $1,3 \text{ MeV}/c^2$ większa niż masa protonu. Jest to mała różnica, ma ona jednak ogromne konsekwencje. Dzięki niej przemiana neutronu jest możliwa. W wyniku tej przemiany powstają trzy cząstki: proton, elektron i odpowiadające mu antyneutrino elektronowe, których suma mas jest mniejsza od masy neutronu. Przemiana swobodnego neutronu następuje średnio po czasie 14 minut i 42 sekund.

Wewnątrz jądra atomowego stabilność nukleonów ulega zmianie. Odpowiedzialne są za to złożone oddziaływania między nukleonami znajdującymi się blisko siebie. Czas życia neutronu wewnątrz jądra atomowego może znacząco różnić się od czasu życia swobodnego neutronu. W szczególności, dla niektórych jąder, rozpad neutronu może nie zachodzić. Przemiana jądra atomowego w wyniku rozpadu neutronu w jego wnętrzu nazywana jest rozpadem β^- (czyt. beta minus). W wyniku oddziaływań między nukleonami możliwe są również inne procesy, takie jak rozpad protonu na neutron z emisją pozytonu i neutrino elektronowego (rozpad β^+). Więcej na temat rozpadów beta możesz przeczytać w innych e-materiałach.

Proton i neutron mają swoje odpowiedniki wśród antycząstek: antyproton i antyneutron o symbolach $\bar{p}$ i $\bar{n}$ (pozioma kreska nad symbolem oznacza antycząstkę). Antyproton składa się z dwóch antykwarków górnych $\bar{u}$ i jednego antykwarka dolnego $\bar{d}$, a neutron z dwóch antykwarków dolnych $\bar{d}$ i jednego antykwarka górnego $\bar{u}$. Ładunki elektryczne antykwarków są przeciwne do ładunków kwarków i dlatego antyproton jest obdarzony ładunkiem elektryczny $-1e$. Antyneutron, tak samo, jak neutron jest elektrycznie obojętny. Antycząstki mają takie same masy i rozmiary jak cząstki, którym odpowiadają.

Słowniczek

Bariony

(ang.: *baryonic particles, baryons*) - cząstki elementarne składające się z trzech kwarków.

Kwarki

(*ang.: quarks*) - cząstki elementarne uważane za fundamentalne, tzn. niedające się podzielić na mniejsze elementy, obdarzone ułamkowym ładunkiem elektrycznym.

Masa konstytuentska kwarka

(*ang.: constituent quark mass*) - szacunkowa masa kwarka, będąca sumą mas samego („gołego”) kwarka i pola, które go otacza; pole to jest wynikiem oddziaływania z pozostałymi kwarkami.

Mezony

(*ang.: mesons*) - cząstki elementarne składające się z pary kwark-antykwar.

Nukleony

(*ang.: nucleons*) - bariony, składniki jąder atomowych, wspólna nazwa dla protonów i neutronów.

1 MeV/c²

(*ang.: megaelectronvolt mass equivalent*) - czyt. megaelektronowolt przez *c* kwadrat. Jednostka masy używana w fizyce subatomowej równa ok. $1,783 \cdot 10^{-30}$ kg. *c* oznacza prędkość światła w próżni.

1 fm

(*ang.: femtometer*) - (femtometr), jednostka używana w fizyce subatomowej, równa 10^{-15} m.

Animacja 3D

Z jakich kwarków składa się proton, a z jakich neutron?

Animacja przedstawia różnice w rozmiarach atomu, jądra atomowego, nukleonów, kwarków u i d oraz elektronu.

Polecenie 1

Na podstawie animacji określ, jakie są rozmiary atomu, jądra atomowego, nukleonów, kwarków oraz elektronów. Wskaż, o ile rzędów wielkości rozmiary te różnią się między sobą. Uzupełnij poniższą tabelkę, podając rząd wielkości poszczególnych obiektów jako wykładnik potęgi liczby 10.

Rząd wielkości rozmiaru wyrażonego w metrach dla każdego z poniższych obiektów. Podaj wykładnik potęgi 10 odpowiadający tym danym.

Obiekt	Atom	Jądro atomowe	Nukleony	Kwarki
n				

Polecenie 2

Uzupełnij poniższe zdania, przesuwając odpowiedzi we właściwe miejsce.

Jądro atomowe jest rzędy wielkości mniejsze od atomu.

Nukleony są razy mniejsze od jądra atomowego.

Kwarki i elektrony uważane są za cząstki punktowe. Ich rozmiary są mniejsze niż fm.

Jeżeli nukleony miałyby rozmiary 1 cm, to atom miałby rozmiary rzędu m.

- 10

100

1000

4

0,001

5

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Uzupełnij poniższe zdania. Użyj słów **proton** albo **neutron** w odpowiedniej formie gramatycznej.

Odpowiedzi:

- a) Masa jest większa niż masa .
- b) Skład kwarkowy to *uud*.
- c) Cząstką uważaną za stabilną jest .
- d) W wyniku przemiany powstaje oraz elektron i odpowiadające mu antyneutrino.

Ćwiczenie 2



Według pomiarów przeprowadzonych w 2010 roku promień protonu wynosi 0,84 fm. Zakładając, że proton ma kształt kulki wyznacz objętość protonu w jednostkach fm³ oraz m³. Wyniki podaj z dokładnością do jednej cyfry po przecinku. Wynik w m³ uzupełnij odpowiednią potęgą liczby 10.

Odpowiedzi:

- Objętość protonu wynosi fm³.
- Objętość protonu wynosi · 10ⁿ m³, gdzie n = .

Obliczenia tego typu pokazują bardzo dobrze, dlaczego femtometr jest naturalną skalą odległości w fizyce jądrowej.

Ćwiczenie 3



Masa spoczynkowa neutronu wynosi $939,565 \text{ MeV}/c^2$. Oblicz masę spoczynkową neutronu w kg. Wynik podaj z dokładnością do czterech cyfr znaczących i uzupełnij wykładnik liczby 10.

Odpowiedź:

Masa spoczynkowa neutronu wynosi $\cdot 10^n \text{ kg}$, $n =$.

Ćwiczenie 4



Oblicz stosunek masy neutronu m_n do masy protonu m_p . Wynik podaj z dokładnością do pięciu cyfr znaczących.

Odpowiedź: $m_n/m_p =$

Ćwiczenie 5



Gdybyśmy znali dokładne masy samych („gołych”) kwarków moglibyśmy zapisać, że

$$\text{masa protonu} = (\text{suma mas „gołych” kwarków } u, u \text{ i } d) + E_{POLA}/c^2,$$

gdzie E_{POLA} to energia pola wzajemnego oddziaływania pomiędzy kwarkami budującymi proton.

Ponieważ kwarki nie występują swobodnie, wprowadzono pojęcie masy kontytuentnej kwarka. Masa konstytuentna kwarka odpowiada sumarycznej masie samego („gołego”) kwarka i pola go otaczającego będącego wynikiem oddziaływania z pozostałymi kwarkami. Masy konstytuentne kwarków są wartościami szacunkowymi i nie mogą być bezpośrednio zmierzone w eksperymencie.

Korzystając z mas konstytuentnych można zapisać, że

$$\text{masa protonu} = (\text{suma mas konstytuentnych kwarków } u, u \text{ i } d).$$

Czy na podstawie faktu, że masa neutronu jest praktycznie taka sama jak masa protonu można wywnioskować, że masy konstytuentne kwarków u i d są w przybliżeniu takie same? Uzasadnij swoją odpowiedź.

Ćwiczenie 6



W wyniku przemiany neutronu powstają trzy cząstki: proton, elektron i odpowiadające mu antyneutrino elektronowe. Różnica mas, Δm , pomiędzy neutronem a produktami przemiany zamieniana jest na energię kinetyczną powstałych cząstek zgodnie ze wzorem $E = \Delta mc^2$. Zakładając, że masa elektronu wynosi $0,511 \text{ MeV}/c^2$, a masa antyneutrino elektronowego jest pomijalnie mała, oblicz, ile energii kinetycznej unoszą powstałe w przemianie cząstki. Wynik podaj w MeV z dokładnością do czterech cyfr znaczących.

Odpowiedź: Energia kinetyczna produktów reakcji wynosi: MeV.

Ćwiczenie 7



Nukleony mogą występować w stanach wzbudzonych, czyli w stanach o podwyższonej energii. Nukleon w stanie wzbudzonym jest traktowany jako osobna cząstka, ponieważ ma inną masę spoczynkową niż nukleon w stanie podstawowym. Wyższa masa spoczynkowa powoduje, że nukleony w stanach wzbudzonych mogą ulegać przemianom, w których powstają cząstki nazywane pionami. Piony, inaczej mezony π , to cząstki zbudowane z pary kwark-antykwar (co symbolicznie można zapisać jako $q\bar{q}$, gdzie q to symbol odpowiedniego kwarka, a $\bar{q}$ odpowiedniego antykwarka). Piony mogą być neutralne (π^0), dodatnio naładowane (π^+) lub ujemnie naładowane (π^-).

Bariony delta, Δ^+ i Δ^0 to cząstki będące nukleonami w stanach wzbudzonych. Cząstka Δ^+ ma masę spoczynkową wynoszącą około $1232 \text{ MeV}/c^2$ i taki sam skład kwarkowy, jak proton. Cząstka Δ^0 ma również masę spoczynkową wynoszącą około $1232 \text{ MeV}/c^2$, a jej skład kwarkowy jest taki sam, jak neutronu. Obie cząstki delta są wyjątkowo nietrwałe i ulegają przemianom średnio po czasie rzędu 10^{-24} s . Cząstki delta mogą ulegać przemianom z emisją naładowanego pionu zgodnie ze schematami:

a) $\Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n$

b) $\Delta^0 \rightarrow \pi^- + p$

Określ, jakie są składy kwarkowe mezonów π^+ i π^- wiedząc, że w podanych przemianach zachowane są liczby kwarków u i d .

Odpowiedź:

Skład kwarkowy mezonu π^+ to .

Skład kwarkowy mezonu π^- to .

Ćwiczenie 8



Niektóre teorie przewidują, że proton może ulec przemianie na cząstki niebędące barionami. Przeprowadzone eksperymenty nie pozwoliły dotąd zaobserwować ani jednej przemiany swobodnego protonu. W związku z tym szacuje się, że średni czas życia protonu musi wynosić ponad 10^{30} lat. O ile rzędów wielkości szacunkowy średni czas życia protonu jest większy od wieku Wszechświata, który szacowany jest na 13,8 miliardów lat? Czy proton słusznie jest uważany za cząstkę stabilną?

Odpowiedź:

Szacunkowy średni czas życia protonu jest większy od wieku Wszechświata o

rzędów wielkości.

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Tomasz Cap
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Kwarkowa budowa nukleonów
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
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: 1) przedstawia jednostki wielkości fizycznych, opisuje ich związki z jednostkami podstawowymi; przelicza wielokrotności i podwielokrotności; 16) przeprowadza obliczenia i zapisuje wynik zgodnie z zasadami zaokrąglania oraz zachowaniem liczby cyfr znaczących wynikającej z dokładności pomiaru lub z danych. XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyki jądrowej. Uczeń: 5) posługuje się pojęciami pierwiastek, jądro atomowe, izotop, proton, neutron, elektron; opisuje skład jądra atomowego na podstawie liczb masowej i atomowej.
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 osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się, • kompetencje cyfrowe.

Cele operacyjne:	Uczeń: 1. objaśnia pojęcia: cząstka fundamentalna i cząstka złożona oraz podaje przykłady takich obiektów; 2. stosuje jednostki używane w fizyce subatomowej: fm oraz MeV/c^2; 3. przelicza masy nukleonów z kg na MeV/c^2 i na odwrót; 4. podaje rozmiary nukleonów i jądra atomowego w jednostkach fm i m; 5. podaje różnice w rozmiarach atomu, jądra atomowego, nukleonów, kwarków i elektronu; 6. określa składy kwarkowe protonu i neutronu, mając podane ładunki i cechy kwarków <i>u</i> i <i>d</i>; 7. potrafi uzasadnić, dlaczego proton jest uważany za cząstkę stabilną.
Strategie nauczania	IBSE
Metody nauczania	wykład informacyjny, rozwiązywanie zadań rachunkowych
Formy zajęć:	praca indywidualna, praca w parach
Środki dydaktyczne:	rzutnik lub ekran do wyświetlania multimedium
Materiały pomocnicze:	–
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel przypomina uczniom podstawowe informacje na temat budowy atomu i jego rozmiarów. Następnie sprawdza wiedzę wyjściową uczniów, pytając, czy wiedzą, jak jest zbudowane jądro atomowe, jakie są jego rozmiary oraz jakie są rozmiary i ładunki neutronu i protonu oraz wprowadza jednostkę femtometra. Uczniowie poznają historię odkrycia protonu i neutronu i oraz źródło ich nazw. Nauczyciel pyta uczniów, czy wiedzą, jakie są rozmiary elektronu i jak rozumieją pojęcie cząstki fundamentalnej; następnie zaciekawia uczniów, mówiąc, że nukleony nie są cząstkami fundamentalnymi i że mają wewnętrzną strukturę. Nauczyciel rozwija temat, wprowadzając pojęcie kwarków, nie podając jeszcze składów kwarkowych protonu i neutronu oraz podaje dane o wszystkich sześciu kwarkach i podaje ich ładunki. Nauczyciel mówi uczniom, że proton i neutron są wg klasyfikacji cząstek elementarnych barionami, czyli cząstkami zbudowanymi z trzech kwarków. Uczniowie dowiadują się, jak kwarki budują cząstki złożone, na przykładzie wybranego barionu. Może być to np. cząstka Λ^0 o składzie kwarkowym <i>uds</i>. Nauczyciel oblicza ładunek elektryczny cząstki Λ^0 sumując ładunki kwarków <i>u</i>, <i>d</i> i <i>s</i>.	

Faza realizacyjna:

Nauczyciel mówi uczniom, że proton i neutron są barionami zbudowanymi tylko z kwarków u i d , a następnie prosi uczniów w parach o zastanowienie się, jak mogą być zbudowane nukleony. Uczniowie podają – wraz z uzasadnieniem – składy kwarkowe protonu i neutronu.

Uczniowie w parach zastanawiają się, jakie mogą być składy kwarkowe protonu i neutronu i weryfikują ich poprawność, sprawdzając wypadkowe ładunki elektryczne.

Nauczyciel podsumowuje wyniki uczniów pokazując animację oraz Rys. 1.

przedstawiający budowę nukleonów. Nauczyciel powinien powiedzieć uczniom, że oba te przedstawienia są poglądowe i że – z powodu występujących między kwarkami oddziaływań – struktura nukleonów jest bardziej skomplikowana. Nauczyciel rozwija temat wprowadzając pojęcia takie jak oddziaływanie silne i gluony.

Na podstawie animacji nauczyciel prosi uczniów o określenie, jakie są względne stosunki rozmiarów atomu, jądra atomowego i nukleonów, a następnie o obliczenie, o ile rzędów wielkości rozmiary poszczególnych struktur różnią się między sobą. Uczniowie mają za zadanie oszacować, o ile rzędów wielkości kwarki są mniejsze od nukleonów. Nauczyciel przypomina pojęcie cząstki fundamentalnej, odnosząc się do omawianego już elektronu.

Uczniowie wykonują obliczenia i interpretują otrzymane wyniki.

Nauczyciel podsumowuje wyniki, zwracając uwagę na różnice w rozmiarach poszczególnych struktur i na rolę oddziaływań pomiędzy ich składnikami.

Nauczyciel wypisuje zebrane dotychczas informacje o neutronie i protonie, podaje uczniom masę protonu w kg i uzmysławia uczniom, że kilogram, podobnie jak metr, nie jest naturalną jednostką do opisu cząstek subatomowych. Następuje wprowadzenie jednostki masy $\frac{MeV}{c^2}$. Nauczyciel wyjaśnia, skąd pochodzi ta jednostka, odwołując się do wzoru $E = mc^2$ i przelicza masę protonu z kg na $\frac{MeV}{c^2}$.

Uczniowie rozwiązują zadanie 3 i 4 z zestawu ćwiczeń.

Nauczyciel komentuje otrzymane wyniki i pyta uczniów, czy z racji, że masy protonu i neutronu są zbliżone, można coś wywnioskować na temat mas kwarków. Nauczyciel wprowadza pojęcie masy konstytuentnej i prosi uczniów w parach o rozwiązanie zadania 5 z zestawu ćwiczeń.

Nauczyciel komentuje wynik, wprowadzając pojęcie masy prądowej (masy „gołych” kwarków) i podkreśla rolę oddziaływań pomiędzy kwarkami.

Nauczyciel argumentuje, dlaczego neutron jest cięższy od protonu i omawia konsekwencje różnicy mas nukleonów. Uświadamia uczniom, że proton jest najlżejszym barionem (można pokazać w tym miejscu masy innych barionów) i wyjaśnia, dlaczego proton jest cząstką stabilną. Uczniowie określają, o ile rzędów wielkości szacunkowy czas życia protonu jest dłuższy od wieku Wszechświata (zadanie 8 z zestawu ćwiczeń) i komentują uzyskane wyniki.

Nauczyciel omawia stabilność neutronu, jego rozpad oraz wprowadza pojęcie czasu życia. Nauczyciel omawia rozpad swobodnego neutronu i prosi uczniów o rozwiązanie

zadania 6 z zestawu ćwiczeń.

Nauczyciel mówi uczniom, że w obecności materii jądrowej (czyli wewnątrz jądra atomowego) możliwa jest przemiana protonu i krótko opisuje przemiany β^- i β^+ .

Nauczyciel odnosi się do stabilności jąder atomowych ze względu na przemiany β^- i β^+ .

Faza podsumowująca:

Nauczyciel podsumowuje zebrane informacje na temat kwarkowej budowy nukleonów i ich czasów życia i wprowadza pojęcie stanu wzbudzonego. Nauczyciel mówi uczniom, że nukleony mogą przebywać (podobnie jak atomy i jądra atomowe) w stanach o podwyższonej energii. Nauczyciel opisuje uczniom cechy cząstek Δ^+ i Δ^0 i porównuje ich masy i składy kwarkowe z masami i składami protonu i neutronu. Nauczyciel wprowadza pojęcie mezonu i pokazuje uczniom, w jaki sposób cząstki delta mogą ulegać przemianom do nukleonów z emisją mezonów π . Nauczyciel prosi uczniów o określenie składów kwarkowych mezonów π (zadanie 7 z zestawu ćwiczeń).

Uczniowie rozwiązują zadanie 7 z zestawu ćwiczeń.

Nauczyciel odnosi się do wyników zadania i opisuje rolę mezonów π w przenoszeniu oddziaływań pomiędzy nukleonami w jądrze atomowym.

Praca domowa:

Zadanie 1 i 2 z zestawu ćwiczeń.

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium

Animacja może być użyta jako materiał wprowadzający, gdyby nauczyciel chciał zastosować strategię odwróconej klasy.