

Wykłady z Fizyki 13



Zbigniew Osiak

Cząstki Elementarne

ORCID

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

OZNACZENIA

B – notka biograficzna

C – ciekawostka

D – propozycja wykonania doświadczenia

H – informacja dotycząca historii fizyki

I – adres strony internetowej

K – komentarz

P – przykład

U – uwaga

Zbigniew Osiak (Tekst)

WYKŁADY Z FIZYKI
Cząstki Elementarne

Małgorzata Osiak (Ilustracje)

© Copyright 2013 by
Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone.
Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji
zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-3954-9

e-mail: zbigniew.osiak@gmail.com

“*Wykłady z Fizyki – Cząstki Elementarne*” są trzynastym z piętnastu tomów pomocniczych materiałów do jednorocznego kursu fizyki prowadzonego przeze mnie na różnych kierunkach inżynierskich. Zainteresowani studiowaniem fizyki znajdą tu podstawowe pojęcia, prawa, jednostki, wzory, wykresy i przykłady.

Uzupełnieniem trzynastego tomu są eBooki:

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Angielsko-polski i polsko-angielski słownik terminów fizycznych*. Self Publishing (2011).

Zapis wszystkich trzydziestu wykładów zgrupowanych w piętnastu tomach zostanie zamieszczony w internecie w postaci eBooków.

-
- Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Mechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Akustyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Hydromechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Grawitacja.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Termodynamika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektryczność.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Magnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektromagnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Optyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Kwanty.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Ciało Stałe.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Jądra.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Cząstki Elementarne.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Teoria Względności.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Stałe Uniwersalne i Jednostki.*

Cząstki elementarne

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

-
- Fizyka cząstek elementarnych 09
 - Rodzaje oddziaływań fundamentalnych 21
 - Leptony 26
 - Kwarki 45
 - Hadrony 64
 - Nośniki oddziaływań 86
 - Liczby kwantowe 92
 - Układy atomo-podobne 108
 - Plazma kwarkowo-gluonowa 118
 - Akceleratory 122

- Fizyka cząstek elementarnych 10
- Model standardowy 11
- Cząstki elementarne 12
- Cząstki fundamentalne 13
- Fermiony 14
- Bozony 15
- Antycząstki 16
- Anihilacja 17
- Kreacja 18
- Generacja 19
- Bozon Higgsa 20

- Fizyka cząstek elementarnych \Leftrightarrow dział fizyki zajmujący się badaniem własności cząstek elementarnych w ramach modelu standardowego.

- Model standardowy \Leftrightarrow teoria rozwinięta w latach 1970-1973, opisująca cząstki elementarne oraz podstawowe oddziaływania między nimi (z pominięciem oddziaływań grawitacyjnych).

W modelu tym cząstki fundamentalne, czyli niemające wewnętrznej struktury, podzielono na kwarki oraz leptony. Cząstki elementarne o złożonej strukturze wewnętrznej, zwane hadronami, zbudowane są z kwarków. Nośnikami oddziaływań silnych, wiążących kwarki wewnątrz hadronów, są gluony. Nośnikami oddziaływań słabych, przejawiających się między innymi w rozpadach beta minus i beta plus, są bozony W i Z. Nośnikami oddziaływań elektromagnetycznych są fotony. Hipotetycznymi nośnikami oddziaływań grawitacyjnych są grawitony.

-
- Cząstki elementarne \Leftrightarrow cząstki, którymi według modelu standardowego są leptony, hadrony, kwarki oraz nośniki oddziaływań.

-
- Cząstki fundamentalne \Leftrightarrow cząstki elementarne nieposiadające wewnętrznej struktury. Są nimi leptony i kwarki oraz ich antycząstki.

• Fermiony \Leftrightarrow cząstki elementarne mające spiny połówkowe.
Fermiony podlegają statystyce Fermiego-Diraca oraz spełniają zakaz Pauliego. Fermionami są leptony, kwarki oraz bariony. Najbardziej znanym fermionem jest elektron, którego spin ma wartość $1/2$.

C Nazwa fermion pochodzi od nazwiska Fermi.

B Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

B Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), angielski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933.

B Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958), szwajcarski fizyk teoretyk pochodzenia austriackiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1945.

• Bozony \Leftrightarrow cząstki elementarne o spinach całkowitych. Bozony podlegają statystyce Bosego-Einsteina oraz nie spełniają zakazu Pauliego. Bozonami są mezony oraz nośniki oddziaływań silnych, słabych i elektromagnetycznych. Najbardziej znanym bozonem jest foton, którego spin ma wartość równą 1.

C Nazwa bozon pochodzi od nazwiska Bose.

B Satyendra Nath Bose (1894-1974), hinduski fizyk teoretyk.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

B Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958), szwajcarski fizyk teoretyk pochodzenia austriackiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1945.

- Antycząstka \Leftrightarrow odpowiednik danej cząstki elementarnej, mający takie same wartości masy, spinu, trzeciej składowej izospinu oraz czasu życia, różniący się od niej znakami ładunku elektrycznego, liczby barionowej, liczby leptonowej oraz dziwności. W przypadku bozonów wartości parzystości cząstki i jej antycząstki są takie same. W przypadku fermionów wartości parzystości cząstki i jej antycząstki różnią się znakami.
- Cząstka i antycząstka po spotkaniu ulegają anihilacji.

C Cząstki są identyczne ze swoimi antycząstkami, jeżeli ich liczby barionowe, trzecie składowe izospinu, ładunki elektryczne i dziwności są równe zeru. Cząstki takie nazywane są cząstkami istotnie obojętnymi.

- Anihilacja swobodna \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że cząstka i jej antycząstka po spotkaniu, nie tworząc struktury atomo-podobnej, zamieniają się w co najmniej dwa fotony o energii równoważnej sumie ich mas (spoczynkowych).

P Elektron i pozytron w wyniku anihilacji swobodnej zamieniają się w dwa fotony o energii 511 keV każdy.

- Kreacja pary cząstka-antycząstka \Leftrightarrow zjawisko polegające na powstawaniu w odpowiednich warunkach pary cząstka-antycząstka z fotonu o energii równoważnej ich łącznej masie (spoczynkowej).

H Kreację pary elektron-pozytron z fotonu gamma po raz pierwszy zaobserwował Blackett w 1933 w udoskonalonej przez niego komorze Wilsona podczas badania promieniowania kosmicznego.

B Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1948.

- Generacja \Leftrightarrow pojęcie związane z klasyfikacją leptonów i kwarków w ramach modelu standardowego.
- Pierwsza generacja: elektron (e), pozytron, neutrino elektronowe (ν_e), antyneutrino elektronowe, kwark górny (u), antykwark górny, kwark dolny (d), antykwark dolny.
- Druga generacja: mion (μ), antimion, neutrino mionowe (ν_μ), antyneutrino mionowe, kwark powabny (c), antykwark powabny, kwark dziwny (s), antykwark dziwny.
- Trzecia generacja: taon (τ), antytaon, neutrino taonowe (ν_τ), antyneutrino taonowe, kwark szczytowy (t), antykwark szczytowy, kwark denny (b), antykwark denny.

- Bozon Higgsa \Leftrightarrow hipotetyczna cząstka o zerowym spinie, tłumacząca dlaczego leptony, kwarki oraz bozony W i Z mają masę. Postulowana masa bozonu Higgsa powinna być większa niż $112 \text{ GeV}/c^2$.

H Hipotezę o istnieniu bozonu, nazwanego bozonem Higgsa, sformułował Higgs w 1964.

C Bozon Higgsa nazywany jest też higonem.

B Peter Ware Higgs (ur. 1929), szkocki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2013.

- Oddziaływania grawitacyjne 22
- Oddziaływania słabe 23
- Oddziaływania elektromagnetyczne 24
- Oddziaływania silne 25

- Oddziaływania grawitacyjne \Leftrightarrow oddziaływania opisywane przez prawo powszechnego ciążenia Newtona oraz prawo Gaussa. Wśród znanych podstawowych oddziaływań najsłabsze są oddziaływania grawitacyjne.

B Sir Isaac Newton (1643-1727), angielski fizyk i matematyk.

B Carl Friedrich Gauss (1777-1855), niemiecki matematyk, fizyk i astronom.

- Oddziaływania słabe \Leftrightarrow krótkozasięgowe oddziaływania, których nośnikami są bozony W^+ , W^- i Z^0 , przejawiające się między innymi podczas rozpadów kwarków i leptonów oraz w rozpadach beta minus i beta plus. W oddziaływaniach słabych nie są spełnione zasady zachowania dziwności (S), parzystości (P), piękna (B), powabu (C), prawdy (T) oraz trzeciej składowej izospinu (I_3).

- Oddziaływania elektromagnetyczne \Leftrightarrow oddziaływania opisywane równaniami Maxwella i wynikającymi z nich prawami szczegółowymi. Oddziaływania elektromagnetyczne są jednym z czterech znanych oddziaływań fundamentalnych. Pozostałe trzy to oddziaływania grawitacyjne, słabe i silne.

- Oddziaływania silne \Leftrightarrow krótkozasięgowe oddziaływania między kwarkami w hadronach. Nośnikami oddziaływań silnych są gluony. Siły działające między nukleonami w jądrze atomowym spowodowane są szczątkowym oddziaływaniem silnym, będącym skutkiem oddziaływania silnego między kwarkami z sąsiadujących ze sobą nukleonów.

- Leptony 27
- Elektron 28
- Mion 30
- Taon 32
- Neutrino elektronowe 34
- Neutrino mionowe 36
- Neutrino taonowe 37
- Oscylacje neutrin 38
- Pozytron 39
- Antymion 40
- Antytaon 41
- Antyneutrino elektronowe 42
- Antyneutrino mionowe 43
- Antyneutrino taonowe 44

- Leptony \Leftrightarrow grupa dwunastu cząstek fundamentalnych, do której należą: elektron (e), mion (μ), taon (τ), neutrino elektronowe (ν_e), neutrino mionowe (ν_μ), neutrino taonowe (ν_τ) oraz ich antycząstki. Elektron, mion i taon obdarzone są ujemnym ładunkiem elementarnym, natomiast neutrina nie mają ładunku elektrycznego. Leptony należą do klasy fermionów o spinie $1/2$, jako cząstki fundamentalne nie mają struktury wewnętrznej. Leptony biorą udział w oddziaływaniach elektromagnetycznych i słabych.

- Elektron (e) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna pierwszej generacji mająca masę (m_e) i ładunek (q_e), wynoszące odpowiednio:

$$m_e = 9,1093826 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_e \cdot c^2 = 0,510998918 \text{ MeV}$$

$$q_e = -1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C} = -e$$

- c – wartość prędkości światła w próżni
- Elektron jest fermionem o spinie $1/2$, ma różny od zera moment magnetyczny. Antycząstką elektronu jest pozytron.
- Elektron nazywany jest też negatonem oraz negatronem.

H Nazwę elektron wprowadził Stoney dla elementarnych ładunków ujemnych w procesie elektrolizy w 1891.

H Do odkrycia elektronu przyczyniło się wielu fizyków. Pierwszoplanową postacią wśród nich był Thomson. Wyniki swoich badań ogłosił w 1897. Elektron nazywał korpuskułą (corpuscle).

H Moment magnetyczny elektronu został precyzyjnie wyznaczony przez Kuscha.

B George Johnstone Stoney (1826-1911), irlandzki fizyk.

B Joseph John Thomson (1856-1940), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1906.

B Polykarp Kusch (1911-1993), amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1955.

- Mion (μ) \Leftrightarrow nietrwała cząstka fundamentalna drugiej generacji, jeden z dwunastu leptonów, o masie (m_μ) i ładunku elektrycznym (q_μ), wynoszącymi odpowiednio:

$$m_\mu = 1,88353140 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

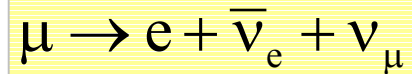
$$m_\mu \cdot c^2 = 105,658369 \text{ MeV}$$

$$\frac{m_\mu}{m_e} = 206,7682838$$

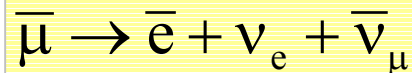
$$q_\mu = -1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C} = -e$$

- c – wartość prędkości światła w próżni
- m_e – masa elektronu • e – ładunek elementarny
- Mion jest fermionem o spinie $1/2$.

- Mion (μ) rozpada się na elektron (e), antyneutrino elektronowe ($\bar{\nu}_e$) oraz neutrino mionowe (ν_μ).



- Antymion ($\bar{\mu}$) rozpada się na pozytron (\bar{e}), neutrino elektronowe (ν_e) oraz antyneutrino mionowe ($\bar{\nu}_\mu$).



H Miony odkryli Neddermeyer i Anderson w 1937.

B Seth Henry Neddermeyer (1907-1988), amerykański fizyk.

B Carl David Anderson (1905-1991), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1936.

- Taon (τ) \Leftrightarrow nietrwała cząstka fundamentalna trzeciej generacji, jeden z dwunastu leptonów, o masie (m_τ) i ładunku elektrycznym (q_τ), wynoszącymi odpowiednio:

$$m_\tau = 3,16777 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_\tau \cdot c^2 = 1776,99 \text{ MeV}$$

$$\frac{m_\tau}{m_e} = 3477,48$$

$$q_\tau = -1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C} = -e$$

- c – wartość prędkości światła w próżni
- m_e – masa elektronu • e – ładunek elementarny
- Taon jest fermionem o spinie $1/2$.

H Lepton tau (taon) odkryli Perl i współpracownicy w 1975.

B Martin Lewis Perl (1927-2014), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1995.

- Neutrino elektronowe (ν_e) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna pierwszej generacji, powstająca podczas rozpadu beta plus. Neutrino elektronowe jest jednym z dwunastu leptonów, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie 1/2, ma masę mniejszą niż 50 eV/c². Neutrino cechuje bardzo duża przenikliwość, nie są pochłaniane przez ośrodek, ponieważ nie biorą udziału w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.



H Istnienie neutrino elektronowego postulował Pauli w 1930, nazywając je neutronem. Nazwę neutrino zaproponował Fermi w 1933. Neutrino elektronowe odkryli Reines i Cowan oraz ich współpracownicy w 1956.

B Wolfgang Pauli (1900-1958), szwajcarski fizyk teoretyk pochodzenia austriackiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1945.

B Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

B Frederick Reines (1918-1998), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1995.

B Clyde Lorrain Cowan (1919-1974), amerykański fizyk.

• Neutrino mionowe (ν_μ) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna drugiej generacji. Neutrino mionowe jest jednym z dwunastu leptonów, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie 1/2, ma masę mniejszą niż 0,5 MeV/c². Neutrino cechuje bardzo duża przenikliwość, nie są pochłaniane przez ośrodek, ponieważ nie biorą udziału w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

H Neutrino mionowe odkryli Lederman, Schwartz oraz Steinberg w 1962.

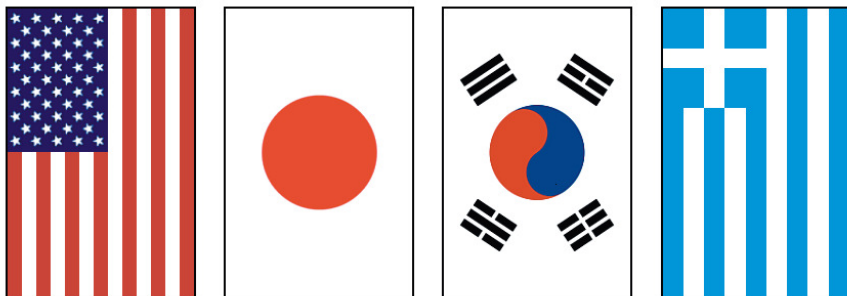
B Jack Steinberger (ur. 1921), amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

B Leon Max Lederman (ur. 1922), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

B Melvin Schwartz (1932-2006), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

• Neutrino taonowe (ν_τ) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna trzeciej generacji. Neutrino taonowe jest jednym z dwunastu leptonów, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie $1/2$, ma masę mniejszą niż $70 \text{ MeV}/c^2$. Neutrino cechuje bardzo duża przenikliwość, nie są pochłaniane przez ośrodek, ponieważ nie biorą udziału w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

H Neutrino taonowe zostało odkryte w lipcu 2000 przez zespół 54 fizyków z USA, Japonii, Korei i Grecji, uczestniczących w eksperymencie o nazwie DONUT (Direct Observation of Nu Tau).



• Flagi państw, z których fizycy uczestniczyli w eksperymencie DONUT.

• Oscylacje neutrin \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że neutrina danego rodzaju z upływem czasu przekształcają się w neutrina innego rodzaju i *vice versa*.

H Hipotezę o oscylacji neutrin sformułował Pontecorvo w latach 1957-1958. Potwierdzono ją w 1998 za pomocą detektora Super-Kamiokande w Japonii oraz detektora SNO (Sudbury Neutrino Observatory) w Kanadzie.

B Bruno Pontecorvo (1913-1993), rosyjski fizyk pochodzenia włoskiego.

B Takaaki Kajita (ur. 1959), japoński fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2015.

B Arthur Bruce McDonald (ur. 1943), kanadyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2015.

- Pozytron \Leftrightarrow antycząstka elektronu, jeden z dwunastu leptonów. Pozytron jest cząstką fundamentalną (nie ma struktury wewnętrznej), ma ładunek przeciwnego znaku niż elektron, a jego masa i spin są takie same.
- Pozytron nazywany jest też pozytonem, antyelektronem, dodatnim elektronem lub cząstką beta plus (gdy jest emitowany przez jądro podczas rozpadu beta plus).

H Pozytron został przewidziany przez Diraca w 1928, a następnie odkryty przez Andersona w 1932.

B Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), angielski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933.

B Carl David Anderson (1905-1991), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1936.

- Antymion ($\bar{\mu}$) \Leftrightarrow antycząstka mionu, jeden z dwunastu leptonów. Nietrwała cząstka fundamentalna drugiej generacji o masie ($m_{\bar{\mu}}$) i ładunku elektrycznym ($q_{\bar{\mu}}$), wynoszącymi odpowiednio:

$$m_{\bar{\mu}} = 1,88353140 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

$$m_{\bar{\mu}} \cdot c^2 = 105,658369 \text{ MeV}$$

$$\frac{m_{\bar{\mu}}}{m_e} = 206,7682838$$

$$q_{\bar{\mu}} = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C} = e$$

- c – wartość prędkości światła w próżni
- m_e – masa elektronu • e – ładunek elementarny
- Antymion jest fermionem o spinie $1/2$.

- Antytaon ($\bar{\tau}$) \Leftrightarrow antycząstka taonu, jeden z dwunastu leptonów. Nietrwała cząstka fundamentalna trzeciej generacji o masie ($m_{\bar{\tau}}$) i ładunku elektrycznym ($q_{\bar{\tau}}$), wynoszącymi odpowiednio:

$$m_{\bar{\tau}} = 3,16777 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

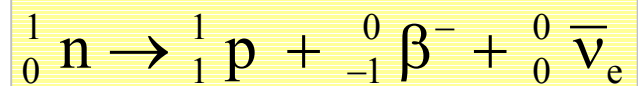
$$m_{\bar{\tau}} \cdot c^2 = 1776,99 \text{ MeV}$$

$$\frac{m_{\bar{\tau}}}{m_e} = 3477,48$$

$$q_{\bar{\tau}} = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C} = e$$

- c – wartość prędkości światła w próżni
- m_e – masa elektronu • e – ładunek elementarny
- Antytaon jest fermionem o spinie $1/2$.

- Antyneutrino elektronowe ($\bar{\nu}_e$) \Leftrightarrow antycząstka neutrina elektronowego, jeden z dwunastu leptonów, powstająca podczas rozpadu beta minus. Antyneutrino elektronowe jest cząstką fundamentalną pierwszej generacji, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie 1/2, ma masę mniejszą niż 50 eV/c².



- n – neutron
- p – proton
- β^- – cząstka beta minus (elektron)

- Antyneutrino mionowe ($\bar{\nu}_\mu$) \Leftrightarrow antycząstka neutrina mionowego, jeden z dwunastu leptonów. Antyneutrino mionowe jest cząstką fundamentalną drugiej generacji, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie 1/2, ma masę mniejszą niż 0,5 MeV/c².

- Antyneutrino taonowe ($\bar{\nu}_\tau$) \Leftrightarrow antycząstka neutrina taonowego, jeden z dwunastu leptonów. Antyneutrino taonowe jest cząstką fundamentalną trzeciej generacji, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie $1/2$, ma masę mniejszą niż $70 \text{ MeV}/c^2$.

- Kwarki 46
- Kwark górny 49
- Kwark dolny 50
- Kwark powabny 51
- Kwark dziwny 52
- Kwark szczytowy (prawdziwy) 53
- Kwark denny (piękny) 54
- Zasada uwięzienia 55
- Swoboda asymptotyczna 56
- Antykwark górny 57
- Antykwark dolny 58
- Antykwark powabny 59
- Antykwark dziwny 60
- Antykwark szczytowy 61
- Antykwark denny 62
- Chromodynamika kwantowa 63

- Kwarki \Leftrightarrow grupa cząstek fundamentalnych, do której należą: kwark górny (u), kwark dolny (d), kwark powabny (c), kwark dziwny (s), kwark szczytowy (t), zwany też prawdziwym, kwark denny (b), nazywany również pięknym, oraz ich antycząstki, antykwark górny (\bar{u}), antykwark dolny (\bar{d}), antykwark powabny (\bar{c}), antykwark dziwny (\bar{s}), antykwark szczytowy (\bar{t}) oraz antykwark denny (\bar{b}).
- Kwarki należą do klasy fermionów o spinie 1/2, jako cząstki fundamentalne nie mają struktury wewnętrznej. Hadrony, czyli bariony i mezony, zbudowane są z kwarków.

- Podstawowe własności kwarków zestawiono w poniższej tabelce:

Kwark	u	d	c	s	t	b
Masa $\left[\frac{\text{GeV}}{c^2} \right]$	0,005	0,01	1,5	0,2	170	4,7
Ładunek elektryczny	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$

- Każdy z kwarków może znajdować się w jednym z trzech stanów w zależności od posiadanego ładunku kolorowego. Analogicznie, każdy z antykwarków również może znajdować się w jednym z trzech stanów w zależności od posiadanego ładunku antykolorowego.
- Pośrednie doświadczalne dowody na istnienie wszystkich kwarków przeprowadzono w latach 1968-1994.

U Kwarki nie funkcjonują jako samoistne obiekty, lecz jedynie w postaci układów, tworząc hadrony (zasada uwięzienia).

H Pojęcie kwarków wprowadził w 1964 Gell-Mann i niezależnie Zweig, który kwarki nazywał asami.

B Murray Gell-Mann (ur. 1929), amerykański fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1969.

B George Zweig (ur. 1937), amerykański fizyk i neurobiolog.

- Kwark górny (u) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna pierwszej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
- Kwark górny posiada masę $0,005 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(+2/3) e$.
- c – wartość prędkości światła w próżni
- e – ładunek elementarny

-
- Kwark dolny (d) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna pierwszej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
 - Kwark dolny posiada masę $0,01 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(-1/3) e$.
 - c – wartość prędkości światła w próżni
 - e – ładunek elementarny

-
- Kwark powabny (c) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna drugiej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
 - Kwark powabny posiada masę $1,5 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(+2/3) e$.
 - c – wartość prędkości światła w próżni
 - e – ładunek elementarny

-
- Kwark dziwny (s) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna drugiej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
 - Kwark dziwny posiada masę $0,2 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(-1/3) e$.
 - c – wartość prędkości światła w próżni
 - e – ładunek elementarny

- Kwark szczytowy (prawdziwy) (t) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna trzeciej generacji należąca do klasy fermionów o spinie 1/2.
- Kwark szczytowy (prawdziwy) posiada masę $170 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(+2/3) e$.
- c – wartość prędkości światła w próżni
- e – ładunek elementarny

- Kwark denny (piękny) (b) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna trzeciej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
- Kwark denny (piękny) posiada masę $4,7 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(-1/3) e$.
- c – wartość prędkości światła w próżni
- e – ładunek elementarny

-
- Zasada uwięzienia \Leftrightarrow zasada głosząca, że istnieją tylko stany związane kwarka i antykwarka (mezony) lub stany związane trzech kwarków (bariony).

• Swoboda asymptotyczna \Leftrightarrow własność kwarków polegająca na tym, że im są one dalej od siebie, tym silniej się przyciągają. Dlatego nie ma kwarków swobodnych.

H Swobodę asymptotyczną przewidział w 1973 Gross i Wilczek oraz niezależnie Politzer.

B Frank Anthony Wilczek (ur. 1951), amerykański fizyk teoretyk polsko-włoskiego pochodzenia, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2004.

B David Jonathan Gross (ur. 1941), amerykański fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2004.

B Hugh David Politzer (ur. 1949), amerykański fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2004.

-
- Antykwark górny (\bar{u}) \Leftrightarrow antycząstka kwarka górnego, cząstka fundamentalna pierwszej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
 - Kwark górny posiada masę $0,005 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(-2/3) e$.
 - c – wartość prędkości światła w próżni
 - e – ładunek elementarny

-
- Antykwark dolny (\bar{d}) \Leftrightarrow antycząstka kwarka dolnego, cząstka fundamentalna pierwszej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
 - Kwark dolny posiada masę $0,01 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(+ 1/3) e$.
 - c – wartość prędkości światła w próżni
 - e – ładunek elementarny

-
- Antykwark powabny (\bar{c}) \Leftrightarrow antycząstka kwarka powabnego, cząstka fundamentalna drugiej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
 - Kwark powabny posiada masę $1,5 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(-2/3) e$.
 - c – wartość prędkości światła w próżni
 - e – ładunek elementarny

- Antykwark dziwny (\bar{s}) \Leftrightarrow antycząstka kwarka dziwnego, cząstka fundamentalna drugiej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
- Kwark dziwny posiada masę $0,2 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(+ 1/3) e$.
- c – wartość prędkości światła w próżni
- e – ładunek elementarny

- Antykwark szczytowy (prawdziwy) (\bar{t}) \Leftrightarrow antycząstka kwarka szczytowego (prawdziwego), cząstka fundamentalna trzeciej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
- Kwark szczytowy (prawdziwy) posiada masę $170 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(-2/3) e$.
- c – wartość prędkości światła w próżni
- e – ładunek elementarny

- Antykwark denny (piękny) (\bar{b}) \Leftrightarrow antycząstka kwarka dennego (pięknego), cząstka fundamentalna trzeciej generacji należąca do klasy fermionów o spinie $1/2$.
- Kwark denny (piękny) posiada masę $4,7 \text{ GeV}/c^2$ oraz ładunek elektryczny $(+ 1/3) e$.
- c – wartość prędkości światła w próżni
- e – ładunek elementarny

-
- Chromodynamika kwantowa \Leftrightarrow teoria opisująca oddziaływania silne między kwarkami.

- Hadrony 65
- Bariony 66
- Nukleony 67
- Proton 68
- Antyproton 70
- Neutron 71
- Antyneutron 74
- Hiperony 75
- Cząstki dziwne 76
- Mezony 77
- Dodatni pion 79
- Ujemny pion 80
- Neutralny pion 81
- Dodatni kaon 82
- Ujemny kaon 83
- Neutralny kaon 84
- Neutralny antykaon 85

-
- Hadrony \Leftrightarrow grupa cząstek elementarnych zbudowanych z kwarków, do której należą bariony i mezony.

-
- Bariony \Leftrightarrow grupa cząstek elementarnych, do której należą nukleony, hiperony oraz ich antycząstki. Bariony są fermionami, składają się z trzech kwarków.

-
- Nukleony \Leftrightarrow protony i neutrony, podstawowe składniki jąder atomowych.

- Proton (p) \Leftrightarrow cząstka elementarna będąca podstawowym składnikiem jądra atomowego, mająca masę (m_p) i ładunek (q_p), wynoszące odpowiednio:

$$m_p = 1,67262171 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_p \cdot c^2 = 938,272029 \text{ MeV}$$

$$\frac{m_p}{m_e} = 1836,15267261$$

$$q_p = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C} = e$$

- c – wartość prędkości światła w próżni
- m_e – masa elektronu

- Proton jest fermionem o spinie $1/2$, utworzonym z trzech kwarków (uud), ma niezerowy moment magnetyczny. Swobodny proton jest stabilny, jego okres półtrwania wynosi ponad $1,6 \cdot 10^{33}$ lat.

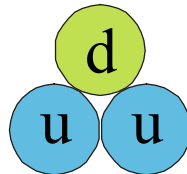
H Proton odkrył Rutherford w 1919.

H Moment magnetyczny protonu odkrył Stern.

B Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

B Otto Stern (1888-1969), niemiecko-amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1943.

proton



- Kwarkowy model protonu

- Antyproton \Leftrightarrow antycząstka protonu, utworzona z trzech antykwarków ($\bar{u} \bar{u} \bar{d}$).

H Antyproton odkryli Chamberlain, Segrè, Wiegand i Ypsilantis w 1955.

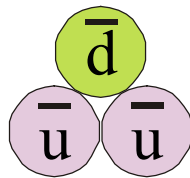
B Owen Chamberlain (1920-2006), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1959.

B Emilio Gino Segrè (1905-1989), amerykański fizyk pochodzenia włoskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1959.

B Clyde Edward Wiegand (1915-1996), amerykański fizyk.

B Thomas (Tom) John Ypsilantis (1928-2000), grecko-amerykański fizyk.

antyproton



- Kwarkowy model antyprotonu

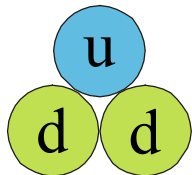
- Neutron (n) \Leftrightarrow cząstka elementarna będąca podstawowym składnikiem jądra atomowego. Masa (m_n) neutronu wynosi:

$$m_n = 1,67492728 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$m_n \cdot c^2 = 939,565360 \text{ MeV}$$
$$\frac{m_n}{m_e} = 1838,6836598$$

- c – wartość prędkości światła w próżni
- m_e – masa elektronu

- Neutron jest fermionem o spinie $1/2$, utworzonym z trzech kwarków (udd), nie ma ładunku elektrycznego, ma niezerowy moment magnetyczny. Swobodny neutron jest niestabilny, jego okres półtrwania wynosi $614,6 \pm 1,3$ s, ulega rozpadowi wskutek rozpadu beta minus.

neutron



- Kwarkowy model neutronu

H Neutron przewidział Rutherford w 1920, a odkrył Chadwick w 1932.

H Moment magnetyczny neutronu wyznaczyli Bloch i Alvarez w 1940.

B Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

B Sir James Chadwick (1891-1974), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1935.

B Luis Walter Alvarez (1911-1988), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1968.

B Felix Bloch (1905-1983), amerykański fizyk pochodzenia szwajcarskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1952.

- Antyneutron \Leftrightarrow antycząstka neutronu, utworzona z trzech antykwarków ($\bar{u} \bar{d} \bar{d}$).

H Antyneutron odkryli Cork, Lambertson, Piccioni i Wenzel w 1956.

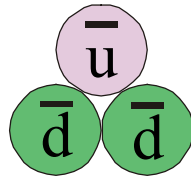
B Bruce Cork (1916-1994), amerykański fizyk.

B Glen R. Lambertson, amerykański fizyk.

B Oreste Piccioni (1916-2002), amerykański fizyk pochodzenia włoskiego.

B William A. Wenzel, amerykański fizyk.

antyneutron



- Kwarkowy model antyneutronu

-
- Hiperony \Leftrightarrow grupa cząstek elementarnych będących fermionami, zbudowanych z trzech kwarków, w tym co najmniej jednego dziwnego (s). Hiperony są barionami.

-
- Cząstki dziwne \Leftrightarrow cząstki elementarne zawierające co najmniej jeden kwark lub antykwark dziwny. Przykładem cząstek dziwnych są hiperony.

• Mezony \Leftrightarrow grupa cząstek elementarnych będących bozonami, zbudowanych z par kwark-antykwar. Należą do niej między innymi dodatni pion $\pi^+ = (\bar{d}u)$, ujemny pion $\pi^- = (d\bar{u})$, neutralny pion $\pi^0 = (\bar{d}d)$ albo $(u\bar{u})$, dodatni kaon $K^+ = (u\bar{s})$, ujemny kaon $K^- = (\bar{u}s)$, neutralny kaon $K^0 = (d\bar{s})$, neutralny antykaon $\bar{K}^0 = (\bar{d}s)$.

H Piony odkrył w promieniowaniu kosmicznym Powell w 1947.

H Kaony odkryto w promieniowaniu kosmicznym w 1947.

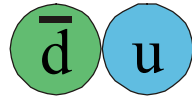
H Złamanie symetrii ładunkowo przestrzennej CP w rozpadach neutralnych kaonów odkryli doświadczalnie Cronin i Fitch w 1964.

B Cecil Frank Powell (1903-1969), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1950.

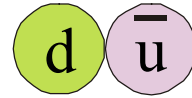
B Val Logsdon Fitch (1923-2015), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1980.

B James Watson Cronin (1931-2016), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1980.

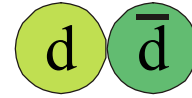
dodatni pion



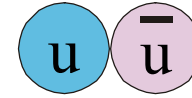
ujemny pion



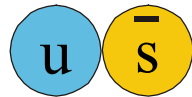
neutralny pion



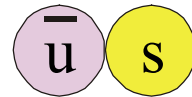
neutralny pion



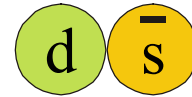
dodatni kaon



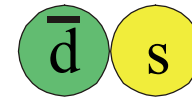
ujemny kaon



neutralny kaon



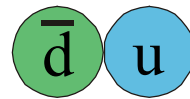
neutralny antykaon



- Kwarkowe modele mezonów

- Dodatni pion (π^+) \Leftrightarrow cząstka elementarna należąca do klasy bozonów utworzona z antykwarka dolnego i kwarka górnego.

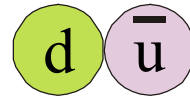
dodatni pion



- Kwarkowy model dodatniego pionu

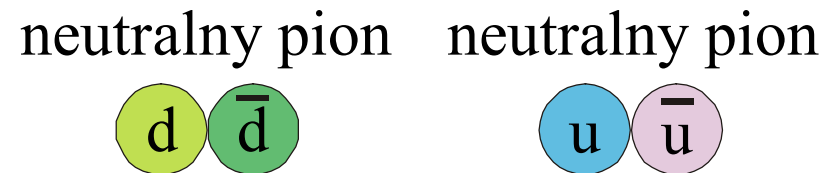
- Ujemny pion (π^-) \Leftrightarrow cząstka elementarna należąca do klasy bozonów utworzona z kwarka dolnego i antykwarka górnego.

ujemny pion



- Kwarkowy model ujemnego pionu

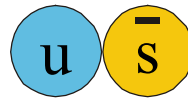
- Neutralny pion (π^0) \Leftrightarrow cząstka elementarna należąca do klasy bozonów utworzona albo z kwarka dolnego i antykwarka dolnego, albo z kwarka górnego i antykwarka górnego.



- Kwarkowe modele neutralnego pionu

- Dodatni kaon (K^+) \Leftrightarrow cząstka elementarna należąca do klasy bozonów utworzona z kwarka górnego i antykwarka dziwnego.

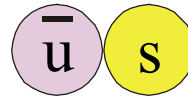
dodatni kaon



- Kwarkowy model dodatniego kaonu

- Ujemny kaon (K^-) \Leftrightarrow cząstka elementarna należąca do klasy bozonów utworzona z antykwarka górnego i kwarka dziwnego.

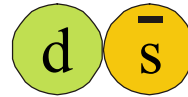
ujemny kaon



- Kwarkowy model ujemnego kaonu

- Neutralny kaon (K^0) \Leftrightarrow cząstka elementarna należąca do klasy bozonów utworzona z kwarka dolnego i antykwarka dziwnego.

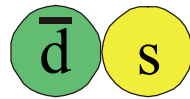
neutralny kaon



- Kwarkowy model neutralnego kaonu

- Neutralny antykaon \Leftrightarrow cząstka elementarna należąca do klasy bozonów utworzona z antykwarka dolnego i kwarka dziwnego.

neutralny antykaon



- Kwarkowy model neutralnego antykaonu

- Nośniki oddziaływań 87
- Nośniki oddziaływań silnych (gluony) 88
- Nośniki oddziaływań słabych (bozony W i Z) 89
- Nośniki oddziaływań elektromagnetycznych (fotony) 90
- Nośniki oddziaływań grawitacyjnych (grawitony) 91

• Nośniki oddziaływań \Leftrightarrow grupa cząstek, będących bozonami, do której należą gluony, bozony W i Z, fotony oraz grawitony. Gluony odpowiadają za oddziaływania silne kwarków wewnątrz hadronów. Bozony W i Z pośredniczą w oddziaływaniach słabych. Fotony są nośnikami oddziaływań elektromagnetycznych. Grawitony przenoszą oddziaływania grawitacyjne. Nośniki oddziaływań nazywane są też bozonami pośredniczącymi.

H Do odkrycia bozonów W i Z w 1983 w znacznym stopniu przyczynili się Rubbia i van der Meer.

B Carlo Rubbia (ur. 1943), włoski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1984.

B Simon van der Meer (1925-2011), holenderski inżynier i fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1984.

•Gluony \Leftrightarrow bezmasowe bozony o spinie 1, niemające ładunku elektrycznego, pośredniczące w oddziaływaniach silnych między kwarkami. Każdemu gluonowi przyporządkowana jest para ładunek kolorowy-ładunek antykolorowy. W zbiorze trzech ładunków kolorowych i trzech antykolorowych może być tylko osiem niezależnych kombinacji dwuelementowych utworzonych z par ładunek kolorowy-ładunek antykolorowy. Dlatego jest tylko osiem gluonów.

U Gluony nie funkcjonują jako samoistne obiekty, są uwięzione w hadronach.

- Bozony W i Z \Leftrightarrow cząstki elementarne pośredniczące w oddziaływaniach słabych.
- Bozon W (wuon) występuje w dwóch postaciach W^+ i W^- , każda o spinie 1 oraz masie $(80,425 \pm 0,03) \text{ GeV}/c^2$. Bozony W^+ i W^- posiadają ładunki elektryczne przeciwnych znaków, stanowią parę cząstka-antycząstka.
- Bozon Z (zeton) ma masę $(91,1876 \pm 0,0021) \text{ GeV}/c^2$, nie posiada ładunku elektrycznego. Bozon Z jest identyczny ze swoją antycząstką.
- c – wartość prędkości światła w próżni
- m_e – masa elektronu

- Foton \Leftrightarrow kwant pola elektromagnetycznego poruszający się w próżni z prędkością o wartości $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s. Fotony są bozonami o spinie 1, nie mają masy oraz ładunku elektrycznego. Energia (E) oraz wartość pędu (p) fotonu określone są poniżej.

$$E = h\nu$$

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

- h – stała Plancka
- ν – częstotliwość drgań wektorów natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej

H Pojęcie fotonu wprowadził Einstein w 1905.

H Nazwę foton zaproponował Lewis w 1926.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

B Gilbert Newton Lewis (1875-1946), amerykański fizyko-chemik.

- Grawiton \Leftrightarrow hipotetyczna cząstka elementarna, która ma być nośnikiem oddziaływań grawitacyjnych, postulowana przez kwantową teorię grawitacji. Grawiton powinien być bozonem o spinie równym 2, nie posiadać masy ani ładunku elektrycznego.

szybkość	masa spoczynkowa	ładunek elektryczny	spin
c	0	0	2

- Liczba barionowa (B) 93
- Dziwność (S) 94
- Hiperładunek (Y) 95
- Izospin (spin izotopowy) (I) 96
- Liczby leptonowe (L) 99
- Parzystość (P) 101
- Piękno (B) 103
- Powab (C) 104
- Prawda (T) 105
- Ładunek kolorowy (kolor) 106

- Liczba barionowa (B) \Leftrightarrow liczba kwantowa przyporządkowana cząstkom elementarnym w następujący sposób:

bariony	antybariony	kwarki	antykwarki	pozostałe
$B = 1$	$B = -1$	$B = 1/3$	$B = -1/3$	$B = 0$

- Zasada zachowania liczby barionowej głosi, że w układzie odosobnionym wypadkowa liczba barionowa jest stała.

- Dziwność (S) \Leftrightarrow liczba kwantowa będąca różnicą liczby antykwarków i kwarków dziwnych wchodzących w skład danej cząstki. Dziwność jest zachowana tylko w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

Przykłady

Kwark dziwny (s): $S = -1$.

Antykwark dziwny : $S = +1$.

Elektron: $S = 0$.

Proton (uud): $S = 0$.

Neutron (udd): $S = 0$.

Hiperon lambda (uds): $S = -1$.

Hiperon omega (sss): $S = -3$.

- Hiperładunek (Y) \Leftrightarrow liczba kwantowa zdefiniowana dla danej cząstki elementarnej, będąca sumą liczby barionowej (B) i dziwności (S).

$$Y = B + S$$

- Izospin (spin izotopowy) (I) \Leftrightarrow addytywna liczba kwantowa przyporządkowana każdemu elementowi danego zbioru (multipletu) hadronów o porównywalnych masach, a różnych wartościach ładunku elektrycznego.

$$I = \frac{N-1}{2}$$

- N – liczebność multipletu
- Elementom multipletu, z których każdy ma izospin (I), przypisuje się addytywną liczbę kwantową, tzw. trzecią składową izospinu (I_3), która zmienia się co jeden od $(-I)$ do (I) w kolejności wzrastających wartości ładunku elektrycznego.

- Kwarkom i antykwarkom pierwszej generacji można również przyporządkować trzecią składową izospinu.
 - Kwark górny (u): $I_3 = +1/2$.
 - Antykwark górny : $I_3 = -1/2$.
 - Kwark dolny (d): $I_3 = -1/2$.
 - Antykwark dolny : $I_3 = +1/2$.
- Izospin jest zachowany tylko w oddziaływaniach silnych, a trzecia składowa izospinu – w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

H Pojęcie izospinu wprowadził Heisenberg w 1932.

B Werner Karl Heisenberg (1901-1976), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1932.

P Singlet (hiperon lambda zero):

$$I = 0, I_3 = 0.$$

P Dublet (proton, neutron):

$$I = 1/2, I_3 = -1/2 \text{ dla neutronu, } I_3 = 1/2 \text{ dla protonu.}$$

P Tryplet (mezon pi minus, mezon pi zero, mezon pi plus):

$$I = 1, I_3 = -1 \text{ dla mezonu pi minus, } I_3 = 0 \text{ dla mezonu pi zero, } I_3 = 1 \text{ dla mezonu pi plus.}$$

P Jądro ${}^A_Z X$:

$$I = \frac{A}{2}, I_3 = \frac{\text{liczba protonów} - \text{liczba neutronów}}{2} = Z - I$$

- Liczby leptonowe (L) \Leftrightarrow cztery liczby kwantowe charakteryzujące leptony oraz antyleptony, czyli elektron (e), pozytron (\bar{e}), neutrino elektronowe (ν_e), antyneutrino elektronowe ($\bar{\nu}_e$), mion (μ), antimion ($\bar{\mu}$), neutrino mionowe (ν_μ), antyneutrino mionowe ($\bar{\nu}_\mu$), taon (τ), antytaon ($\bar{\tau}$), neutrino taonowe (ν_τ) oraz antyneutrino taonowe ($\bar{\nu}_\tau$). Są nimi liczba leptonowa (L), elektronowa liczba leptonowa (L_e), mionowa liczba leptonowa (L_μ) oraz taonowa liczba leptonowa (L_τ), określone jak w poniższej tabelce:

	e	\bar{e}	ν_e	$\bar{\nu}_e$	μ	$\bar{\mu}$	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	τ	$\bar{\tau}$	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$
L	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
L_e	+1	-1	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
L_μ	0	0	0	0	+1	-1	+1	-1	0	0	0	0
L_τ	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1	+1	-1

- Liczby leptonowe pozostałych cząstek elementarnych są równe zeru.
- Zasada zachowania liczb leptonowych głosi, że w układzie odosobnionym wypadkowa każdej z czterech liczb leptonowych jest stała.

H Zasada zachowania liczb leptonowych dla każdej z generacji leptonów oddzielnie została doświadczalnie potwierdzona przez Ledermana, Schwartza oraz Steinberga.

B Jack Steinberger (ur. 1921), amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

B Leon Max Lederman (ur. 1922), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

B Melvin Schwartz (1932-2006), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

- Parzystość (P) \Leftrightarrow multiplikatywna liczba kwantowa charakteryzująca cząstki elementarne, określona w następujący sposób:
- $P = +1$ dla cząstki opisywanej parzystą funkcją falową $\Psi(x, y, z) = \Psi(-x, -y, -z)$.
- $P = -1$ dla cząstki opisywanej nieparzystą funkcją falową $\Psi(x, y, z) = -\Psi(-x, -y, -z)$.
- Parzystość układu cząstek jest równa iloczynowi parzystości poszczególnych cząstek układu. Dla fermionów $P = +1$, a dla antyfermionów $P = -1$. Dla bozonów i antybozonów $P = +1$.
- Zachowanie parzystości jest równoważne żądaniu, aby prawa fizyki były takie same w danym układzie odniesienia i jego lustrzanym odbiciu.

H Lee i Yang w październiku 1956 sformułowali hipotezę, że zasada zachowania parzystości nie jest spełniona w oddziaływaniach słabych. Słuszność tej hipotezy wykazała doświadczalnie Wu z zespołem w lutym 1957. Okazało się, że jądra kobaltu ^{60}Co wirujące zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara podczas rozpadu beta minus zachowywały się inaczej (emitowały inną ilość elektronów) niż jądra wirujące w kierunku przeciwnym.

H Lee i Yang otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w następnym roku po dokonaniu odkrycia.

B Tsung-Dao Lee (ur. 1926), amerykański fizyk teoretyk pochodzenia chińskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1957.

B Chen-Ning Franklin Yang (ur. 1922), amerykański fizyk teoretyk pochodzenia chińskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1957.

B Chien-Shiung Wu (1912-1997), amerykańska fizyczka pochodzenia chińskiego.

- Piękno (B) \Leftrightarrow addytywna liczba kwantowa będąca różnicą liczby antykwarków i kwarków dennych (piękných) wchodzących w skład danej cząstki.
- Piękno jest zachowane tylko w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

Przykłady

Kwark denny (piękny) (b): $B = -1$.

Antykwark denny (piękny) (\bar{b}): $B = +1$.

Elektron: $B = 0$.

Proton (uud): $B = 0$.

Neutron (udd): $B = 0$.

- Powab (C) \Leftrightarrow addytywna liczba kwantowa będąca różnicą liczby kwarków i antykwarków powabnych wchodzących w skład danej cząstki. Powab jest zachowany tylko w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

Przykłady

Kwark powabny (c): $C = +1$.

Antykwark powabny (\bar{c}): $C = -1$.

Elektron: $C = 0$.

Proton (uud): $C = 0$.

Neutron (udd): $C = 0$.

Sigma (uuc): $C = +1$.

- Prawda (T) \Leftrightarrow addytywna liczba kwantowa będąca różnicą ilości kwarków i antykwarków szczytowych (prawdziwych) wchodzących w skład danej cząstki.
- Prawda jest zachowana tylko w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

Przykłady

Kwark szczytowy (prawdziwy) (t): $T = +1$.

Antykwark szczytowy (prawdziwy) (\bar{t}): $T = -1$.

Elektron: $T = 0$.

Proton (uud): $T = 0$.

Neutron (udd): $T = 0$.

- Ładunek kolorowy (kolor) \Leftrightarrow uporządkowana trójka liczb kwantowych. Istnieją trzy kolory: czerwony (R), zielony (G) i niebieski (B).

$$R = \left(+\frac{1}{2}, 0, -\frac{1}{2} \right)$$

$$G = \left(-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, 0 \right)$$

$$B = \left(0, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \right)$$

- Istnieje też ładunek bezbarwny.

$$0 = (0, 0, 0)$$

- Każdemu kolorowi odpowiada antykolor, są nimi: antyczerwony (\bar{R}), antyzielony (\bar{G}) i antyniebieski (\bar{B}).

$$\bar{R} = \left(-\frac{1}{2}, 0, +\frac{1}{2} \right)$$
$$\bar{G} = \left(+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, 0 \right)$$
$$\bar{B} = \left(0, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right)$$

- Ładunki kolorowe i antykolorowe, przyporządkowane w odpowiedni sposób kwarkom i gluonom, umożliwiają opis oddziaływań silnych.

- Atom 109
- Atom egzotyczny 110
- Kwarkonium 111
- Bottomonium 112
- Charmonium 113
- Mezonium 114
- Pozytronium 115
- Antyatom 116
- Antymateria 117

- Atom \Leftrightarrow najmniejsza część pierwiastka chemicznego. Atom składa się z dodatnio naładowanego jądra i krążących wokół niego po dozwolonych orbitach elektronów.

C Atomy nazywano dawniej niedziałkami.

-
- Atom egzotyczny \Leftrightarrow atom, którego jądro jest utworzone z dodatnio naładowanej cząstki elementarnej innej niż proton lub w którym elektron jest zastąpiony przez ujemnie naładowaną cząstkę elementarną.

-
- Kwarkonium \Leftrightarrow mezon będący układem atomo-podobnym, utworzony z kwarka i odpowiadającego mu antykwarka. Znanymi kwarkoniami są bottomonium oraz charmonium.

- Bottomonium \Leftrightarrow mezon, będący atomo-podobnym układem, jaki tworzą kwark piękny (b) oraz antykwark piękny (\bar{b}) powiązane oddziaływaniem silnym. Bottomonium nazywane jest też botomonium oraz kwarkonium pięknym (niskim).

- Charmonium \Leftrightarrow mezon, będący atomopodobnym układem, jaki tworzą kwark powabny (c) oraz antykwark powabny (\bar{c}) powiązane oddziaływaniem silnym. Układ ten w najniższym stanie energetycznym jest tożsamy z cząstką J/psi (J/Ψ). Została ona odkryta 11 listopada 1974 przez Tinga i współpracowników, którzy nazwali ją cząstką J, oraz niezależnie (również 11 listopada 1974) przez Richtera i współpracowników, którzy nazwali ją cząstką psi (Ψ). Stąd nazwa – cząstka J/Ψ .
- Charmonium nazywane jest też czarmonium, kwarkonium powabnym oraz cyganką (gypsy).

B Samuel Chao Chung Ting (ur. 1936), amerykański fizyk pochodzenia chińskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1976.

B Burton Richter (ur. 1931), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1976.

- Mezonium \Leftrightarrow atom, w którym elektron został zamieniony przez mion (μ).
- Mezonium nazywane jest też atomem mezonowym.

- Pozytronium \Leftrightarrow atomo-podobny układ utworzony z elektronu i pozytronu. Jedna z tych cząstek spełnia rolę jądra, a druga krąży wokół niej. Pozytronium jest układem niestabilnym i ulega anihilacji. Istnieją dwa rodzaje pozytronium – para pozytronium i orto pozytronium. Para pozytronium, w którym pozytron i elektron mają spiny antyrównoległe, anihiluje po średnim czasie życia wynoszącym 10^{-10} s, produkując dwa fotony. Orto pozytronium, w którym pozytron i elektron mają spiny równoległe, anihiluje po średnim czasie życia wynoszącym 10^{-7} s, produkując trzy fotony.

-
- Antyatom \Leftrightarrow atom utworzony jedynie z antycząstek. Jego jądro jest zbudowane z antyprotonów i antyneutronów. Po dozwolonych orbitach krążą wokół jądra pozytrony.

- Antymateria \Leftrightarrow materia utworzona z antycząstek.

- Plazma 119
- Plazma kwarkowo-gluonowa 120

- Plazma \Leftrightarrow całkowicie zjonizowany gaz, w którym liczby ładunków dodatnich i ujemnych są jednakowe. Plazma nazywana jest też czwartym stanem skupienia.

H Pojęcie plazmy wprowadził Langmuir w 1928.

B Irving Langmuir (1881-1957), amerykański fizyko-chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1932.

- Plazma kwarkowo-gluonowa \Leftrightarrow hipotetyczna materia utworzona ze swobodnych kwarków i gluonów w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury.

- Akcelerator 122
- Częstotliwość cyklotronowa 123
- Cyklotron 124
- Betatron 127
- Kolider (zderzacz) 128

-
- Akcelerator \Leftrightarrow urządzenie służące do przyspieszania naładowanych cząstek elementarnych. Akceleratory dzielą się na liniowe i kołowe. Przyspieszenia i tory cząstek zależą od odpowiednio dobranego pola elektrycznego i magnetycznego.

- Częstotliwość cyklotronowa \Leftrightarrow częstotliwość obiegu okręgu przez cząstkę o ładunku (q) i masie (m) w polu magnetycznym o indukcji magnetycznej (B) w przypadku prostopadłego wejścia cząstki w pole.

$$f = \frac{qB}{2\pi m}, \quad f = \frac{1}{T}, \quad [f] = \frac{1}{s} = \text{Hz}$$

- T – czas obiegu okręgu

•Cyklotron \Leftrightarrow kołowy akcelerator jonów. Stanowi go umieszczona w komorze próżniowej metalowa puszka przecięta w połowie na dwie jednakowe części w kształcie litery D, zwane duantami. Duanty znajdują się w stałym polu magnetycznym, a w szczelinie między nimi istnieje okresowo zmienne pole elektryczne, wytworzone przez przyłożenie między duantami napięcia zmieniającego się z tzw. częstotliwością cyklotronową. Zasada działania cyklotronu polega na tym, że naładowana cząstka, wpadając prostopadle do wektora indukcji stałego pola magnetycznego, porusza się po okręgu leżącym w płaszczyźnie prostopadłej do indukcji pola. W obszarze między duantami cząstka jest przyspieszana przez pole elektryczne, uzyskuje większą szybkość, wskutek czego zaczyna krążyć po okręgu o większym promieniu. Wartość napięcia między duantami ma wpływ na liczbę obiegów, jakie musi wykonać jon, zanim osiągnie maksymalną szybkość.

- Jon o ładunku (q) i masie (m) posiada na wyjściu z cyklotronu energię kinetyczną daną poniższym wzorem.

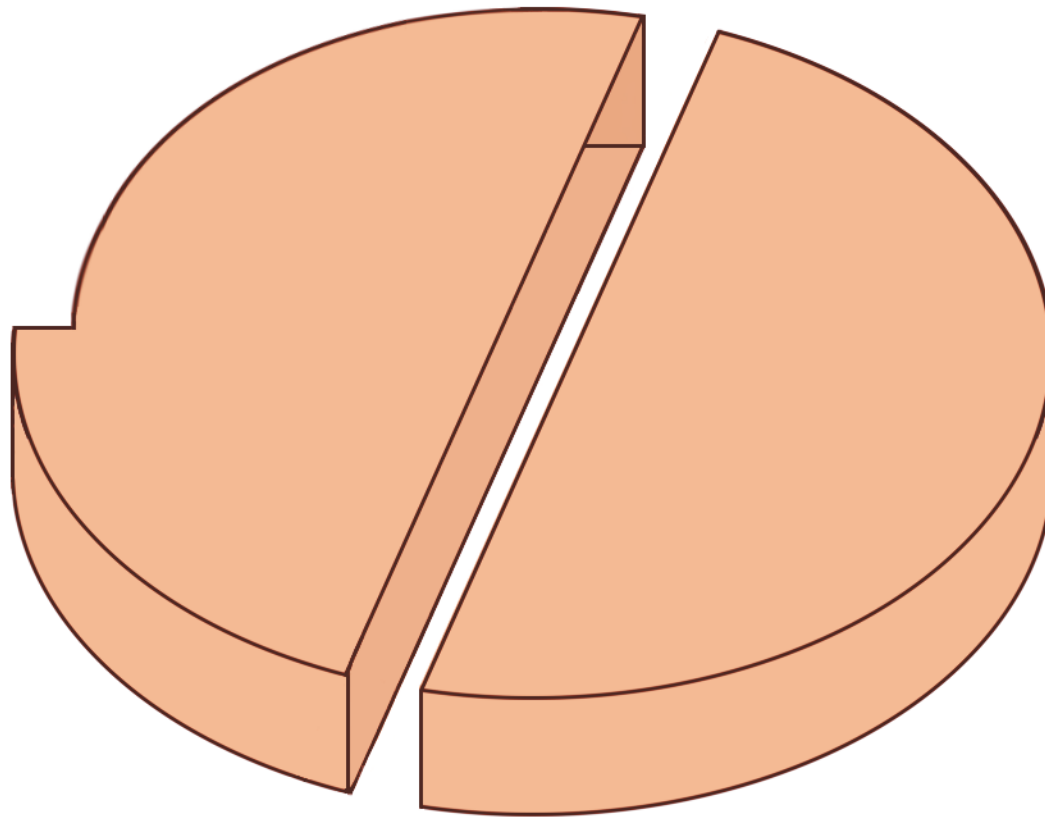
$$E_k = \frac{r^2 B^2 q^2}{2m}$$

- r – promień duantu
- B – wartość indukcji magnetycznej

H Pierwszy cyklotron skonstruowali Lawrence i Livingston 9 stycznia 1931. Miał on średnicę około 11,43 cm. Jony wodoru, przyspieszane napięciem 1800 woltów, uzyskiwały energie do 80000 elektronowoltów.

B Ernest Orlando Lawrence (1901-1958), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1939.

B Milton Stanley Livingston (1905-1986), amerykański fizyk.



• Duanty

• Betatron \Leftrightarrow kołowy akcelerator elektronów, stanowi go komora próżniowa znajdująca się między biegunami elektromagnesu zasilanego prądem zmiennym. Wewnątrz komory umieszczone jest źródło elektronów w postaci preparatu promieniotwórczego. Zasada działania betatronu polega na tym, że elektron wpadający w zmienne pole magnetyczne prostopadle do indukcji magnetycznej porusza się po orbicie leżącej w płaszczyźnie prostopadłej do wektora indukcji magnetycznej. Elektron ten jest przyspieszany przez wirowe pole elektryczne, towarzyszące zmiennemu polu magnetycznemu. Promień stabilnej orbity kołowej, zgodnie z tzw. warunkiem betatronowym, odpowiada wartości indukcji pola magnetycznego równej połowie średniej wartości indukcji w płaszczyźnie tej orbity. Betatrony umożliwiają nadanie elektronom energii kinetycznej około 300 MeV.

H Pierwszy betatron skonstruował Kerst w 1940.

B Donald William Kerst (1911-1993), amerykański fizyk.

- Kolider (zderzacz) \Leftrightarrow olbrzymi akcelerator służący do badania zderzeń cząstek o wysokich i superwysokich energiach.

C Największy na świecie kolider hadronów, LHC (Large Hadron Collider), znajduje się w CERN.

Wykłady z Fizyki 13



Zbigniew Osiak

Cząstki Elementarne