

Wstęp

do fizyki cząstek elementarnych

Wykład pierwszy:
uwagi wstępne

M. Praszalowicz – teoria

E. Richter-Was – doświadczenie

L. Motyka – ćwiczenia z teorii

http://th-www.if.uj.edu.pl/~michal/wfc_2021/

Zaliczenie:

ćwiczenia teor. – kolokwium zaliczeniowe (?)

egzamin pisemny z części doświadczalnej

egzamin ustny z części teoretycznej

ocena: $2/3$ T + $1/3$ D

MP pok. B-2-24

O czym to jest?

1. Z czego zbudowana jest materia na poziomie fundamentalnym?
2. Cząstki elementarne i złożone.
3. Jak oddziałują podstawowe składniki materii?
4. Jak opisać to oddziaływanie:

mechanika kwantowa

szczególne teoria względności



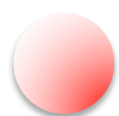
kwantowa teoria pola

5. Jak to obserwujemy?

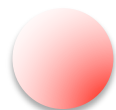
akceleratory (promienie kosmiczne)

detektory

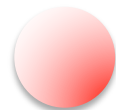
Składniki materii



u [$q = 2/3$]



c



t

kwarki



d [$q = -1/3$]



s



b

spin 1/2



e [$q = 1$]

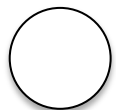


μ

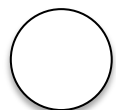


τ

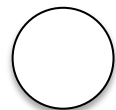
leptony



ν_e [$q = 0$]



ν_μ



ν_τ

Składniki materii

Atomy:

jądra atomowe (**protony** + **neutrony**)
i **elektrony** krążące wokół jąder

związane są dzięki **oddziaływaniu elektromagnetycznemu**

Promieniowanie elektromagnetyczne: **fotony**

Nie potrzebujemy innych składników, żeby opisać całą
tablicę Mendelejewa

Składniki materii - leptony

Leptony – czastki na prawdę elementarne

leptony	symbol	masa [MeV/c ²]	średni czas życia [s]	ładunek elektryczny
elektron	e	0,511	trwały	-1
mion	μ	105,658	$2,197 \cdot 10^{-6}$	-1
taon	τ	1776,86	$2,903 \cdot 10^{-13}$	-1

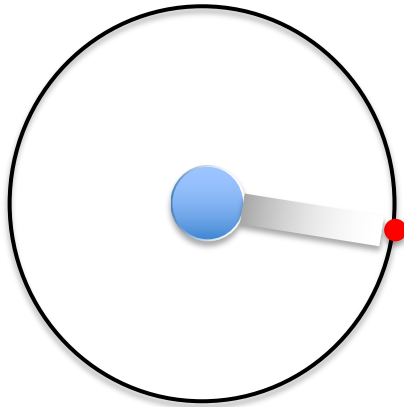
Każdy lepton naładowany posiada stowarzyszone neutrino, które mają masy rzędu 0.1 eV

Antycząski.

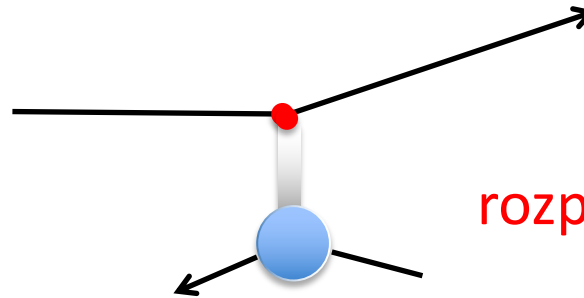
Składniki materii - kwarki

kwarki	symbol	masa	ładunek elektryczny
górnny	u	$2.16_{-0,26}^{+0,49} \text{ MeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$
dolny	d	$4.67_{-0,17}^{+0,48} \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$
powabny	c	$1,27_{-0,09}^{+0,02} \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$
dziwny	s	$93_{-5}^{+11} \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$
szczytowy (prawdziwy)	t	$172,0 \pm 0,4 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$
denny (piękny)	b	$4,18_{-0,02}^{+0,03} \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$

Oddziaływania

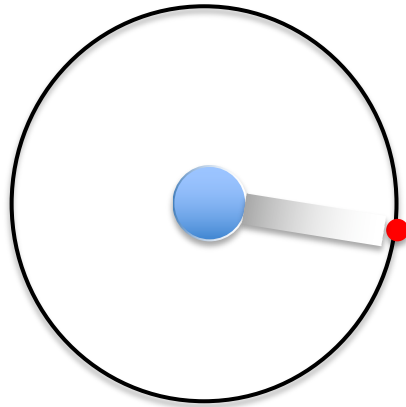


stan związany
pole elektromagnetyczne



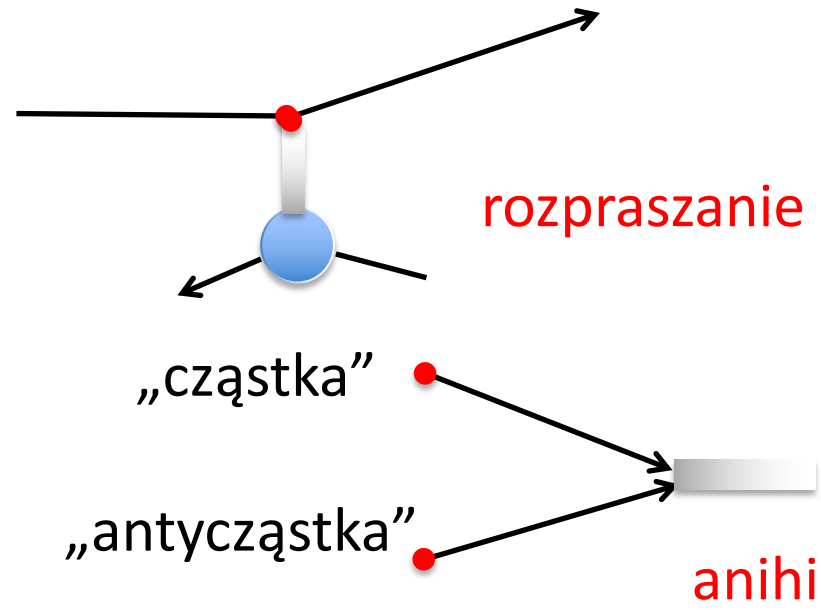
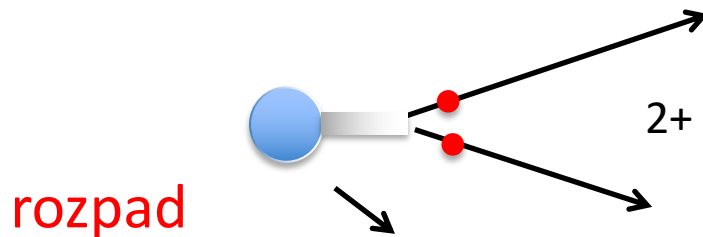
rozpraszanie

Oddziaływania



stan związany
pole elektromagnetyczne

kwantowa teoria pola:

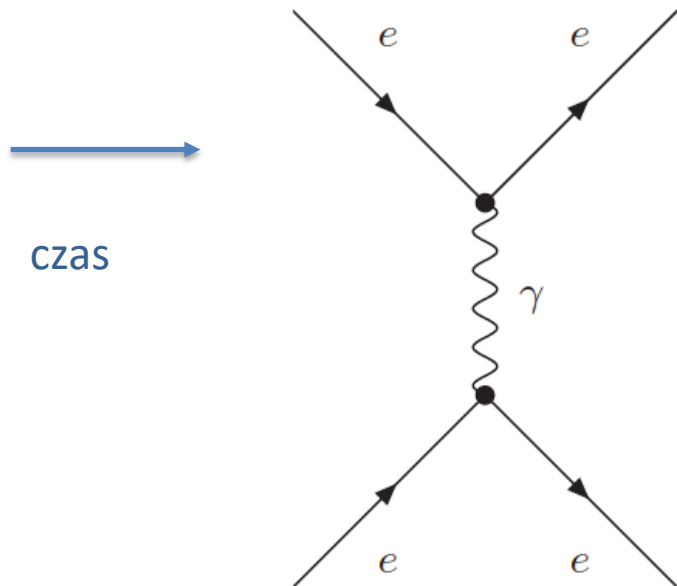


masa, liczba cząstek – niezachowane,

energia, pęd, ładunek ... - zachowane

Oddziaływania

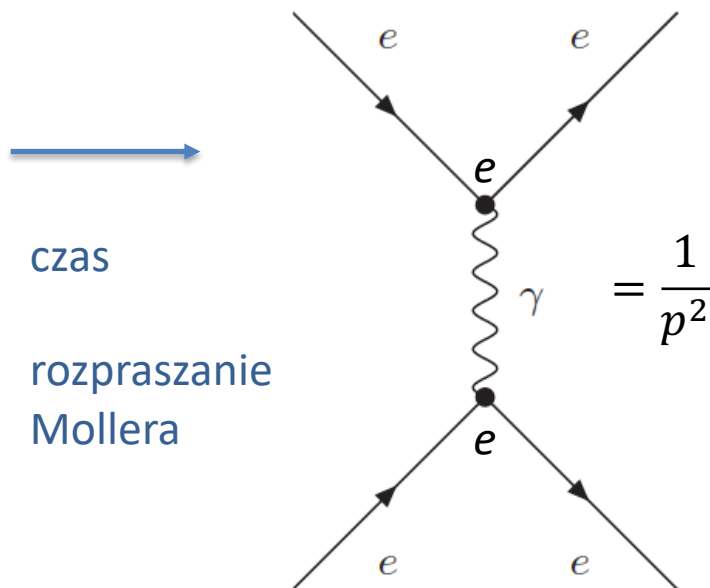
Język, którym posługujemy się do opisu oddziaływań, oparty jest na **diagramach Feynmana**. Oddziaływania polegają na **wymianie bozonów pośredniczących**.
Elektrodynamika: wymiana fotonu



Diagramowi F. odpowiada ściśle określone wyrażenie matematyczne.

Elektrodynamika

Język, którym posługujemy się do opisu oddziaływań, oparty jest na **diagramach Feynmana** (amplituda kwantowa). Oddziaływania polegają na **wymianie bozonów pośredniczących**.
Elektrodynamika: wymiana fotonu



Diagramowi F. odpowiada ściśle określone wyrażenie matematyczne.

linie zewnętrzne (typy cząstek)

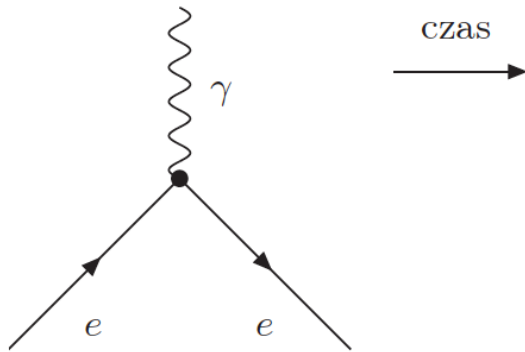
wierzchołki (stała sprzężenia e , macierz Diraka)

linie wewnętrzne – propagatory (p czteropęd niesiony przez foton)

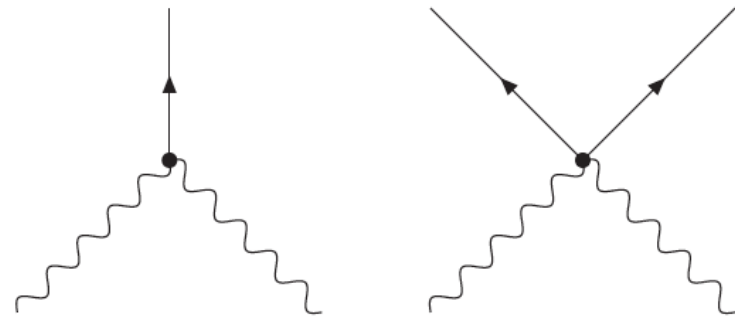
Różne teorie dopuszczają różne typy linii i wierzchołków.

Elektrodynamika

dopuszczalne linie i wierzchołki:

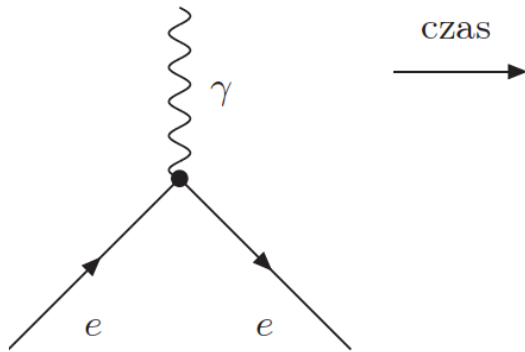


Niedopuszczalne wierzchołki:

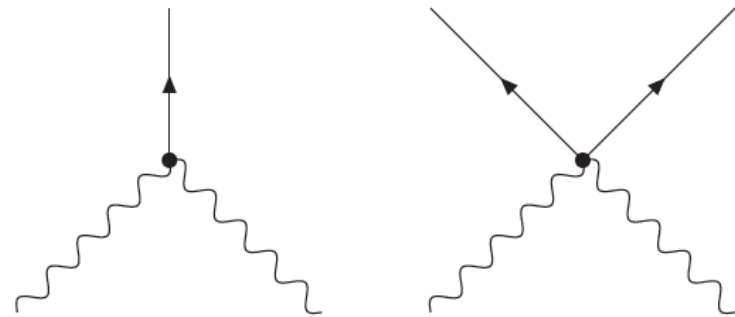


Elektrodynamika

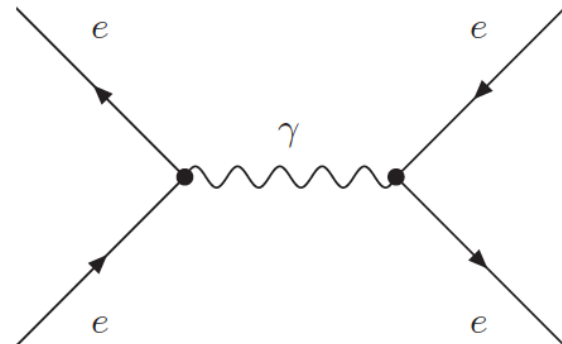
dopuszczalne linie i wierzchołki:



Niedopuszczalne wierzchołki:



Antycząstki:
cząstki „poruszające się do tyłu w czasie”,
anihilacja:



Elektrodynamika

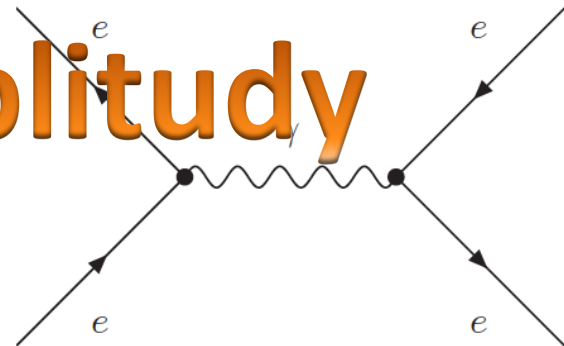
dopuszczalne linie i wierzchołki:

Niedopuszczalne wierzchołki:

elektrodynamika kwantowa
podaje prawdopodobieństwa
zajścia danego procesu:

Antycząstki
cząstki „poruszające się do tyłu w czasie”,
anihilacja:

kwadrat amplitudy



Elektrodynamika

Uwaga:

obrazek oparty na wymianach fotonu jest faktycznie odzwierciedleniem rachunku zaburzeń niezależnego od czasu. Rachunek zaburzeń można stosować, jeżeli mamy do dyspozycji „mały parametr”. W przypadku elektrodynamiki jest to tzw. stała struktury subtelnej:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{1}{137,036} = 7,297 \cdot 10^{-3}$$

Rozwinięcie perturbacyjne nie nadaje się do opisu stanów związanych (atom wodoru), choć w dalszym ciągu można myśleć o potencjale jako wymianie nieskończonej liczby fotonów.

Oddziaływania silne i słabe

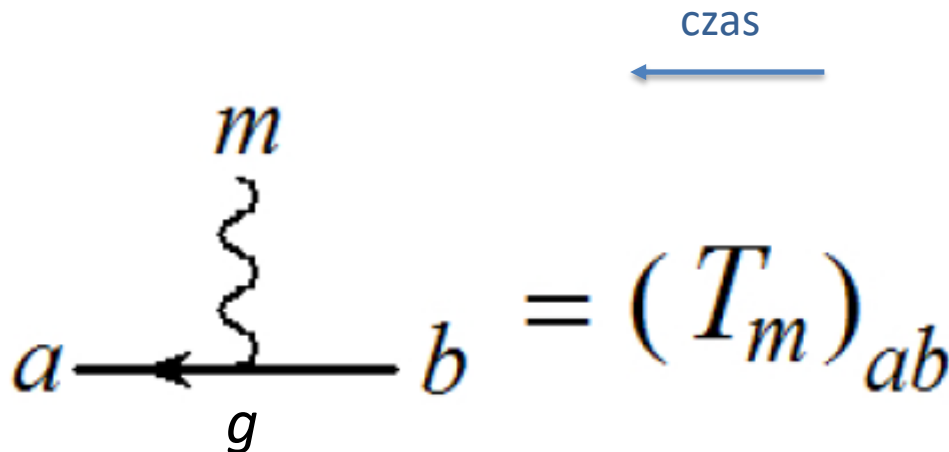
Elektrodynamika – ładunek jest liczbą: e

Oddz. silne i słabe – ładunek jest macierzą: $g T_{ab}^m$

oddziaływania słabe – trzy macierze Pauliego ($m = 1, 2, 3$) 2×2

oddziaływania silne – osiem macierzy Gell-Manna 3×3 ($m = 1, 2, \dots, 8$)

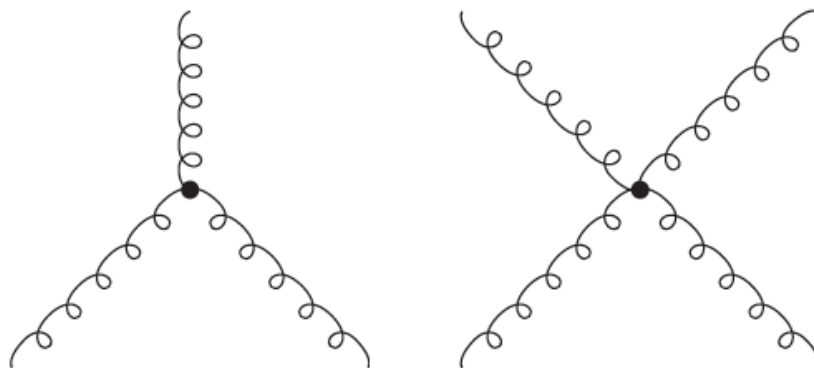
podstawowy wierzchołek:



„fotony” niosą liczbę kwantową m ,
fermiony liczby kwantowe a, b

Oddziaływania silne i słabe

nowe wierzchołki



samooddziaływanie
bozonów pośredniczących

podstawowy wierzchołek:

$$a \leftarrow b = (T_m)_{ab}$$

„fotony” niosą liczbę kwantową m ,
fermiony liczby kwantowe a, b

Oddziaływania silne

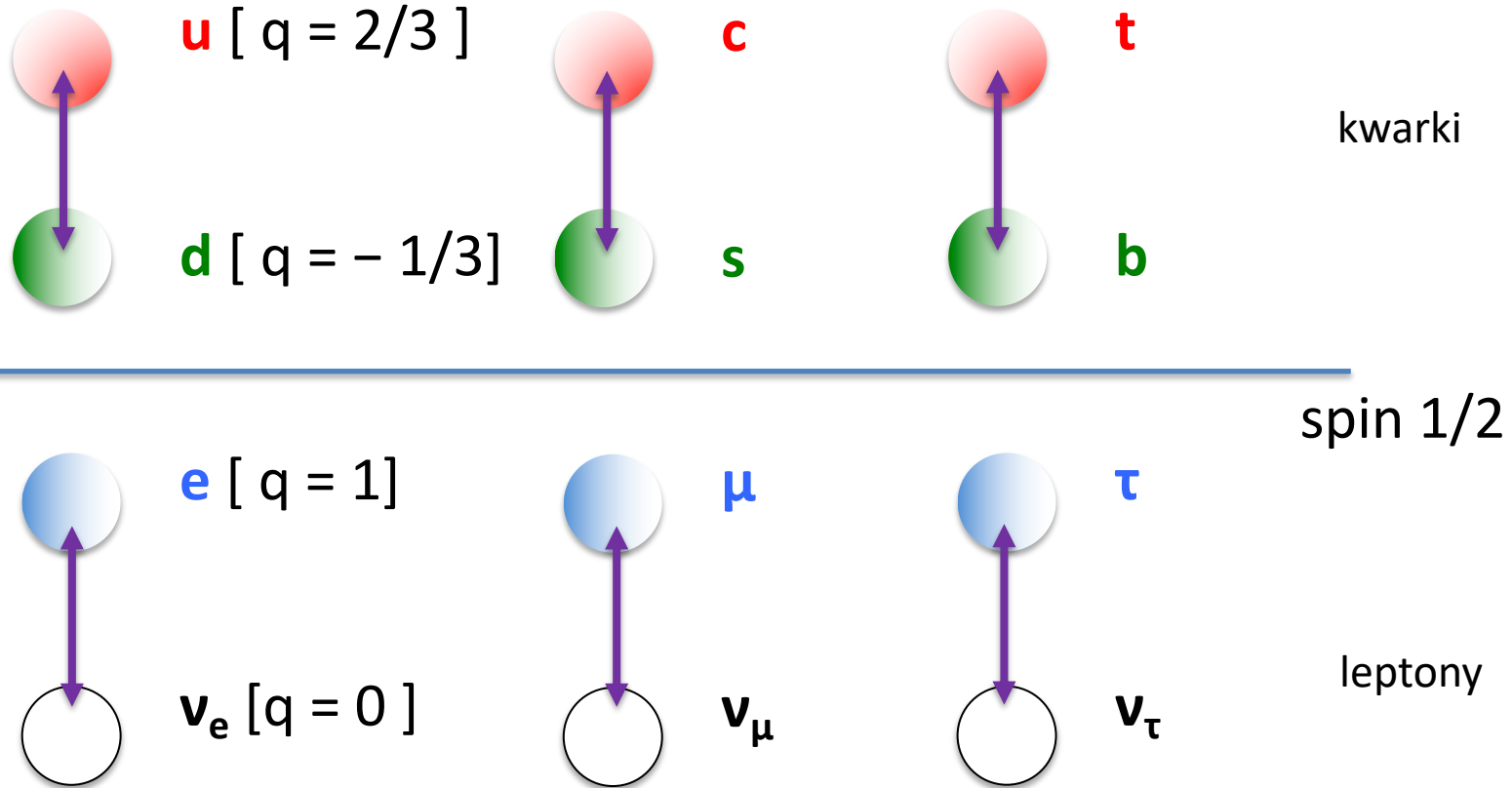
- oddziałują tylko kwarki, liczby kwantowe $a, b = 1, 2, 3$ kolor elektrony, fotony, neutrina etc. nie oddziałują silnie
- bozony pośredniczące: gluony (ang. glue=klej) $m = 1, 2, \dots, 8$
- gluony samoodziałują
- grupa cechowania SU(3)
- propagator gluonu jak fotonu: $1/p^2$, gluony są bezmasowe
- siła oddziaływań rośnie z odległością: nie obserwujemy asymptotycznie ani kwarków ani gluonów (uwięzienie)
- obserwujemy tylko stany związane kwarków

Teoria oddziaływań silnych, chromodynamika kwantowa, jest praktycznie kopią elektrodynamiki z nieabelową (SU(3)) grupą cechowania, elektrodynamika oparta jest na grupie U(1) – mnożenie funkcji falowej przez fazę zależną od x

Oddziaływania słabe

- trzy bozony pośredniczące Z^0 , W^+ , W^-
- oddziaływania poprzez W łączą dublety kwarkowe i leptonowe

Składniki materii



Uwaga: mieszanie kwarków i neutrin

Oddziaływania słabe

- trzy bozony pośredniczące Z^0, W^+, W^-
- oddziaływania poprzez W łączą dublety kwarkowe i leptonowe
- oddziaływania poprzez Z nie zmieniają typu cząstki
- wyjściowa symetria $SU(2) \times U(1)$ jest złamana do $U(1)$ elektrodynamika
- mechanizm Higgsa
- propagatory bozonów pośredniczących: $\frac{1}{p^2 - M^2}$
- dla małych przekazów pędu $\frac{g^2}{p^2 - M^2} \rightarrow \frac{g^2}{M^2} \sim G_F$
- bozony pośredniczące mają masy
- nie ma stanów związanych poprzez oddziaływania słabe
- typowy proces: rozpad beta

Oddziaływania

nazwa	symbol	masa	ładunek elektryczny
foton	γ	0	0
gluony	g lub G	0	0
bozon W	W^{\pm}	$80,379 \pm 0,012 \text{ GeV}/c^2$	± 1
bozon Z	Z^0	$91,1876 \pm 0,0021 \text{ GeV}/c^2$	0
bozon Higgsa	H	$125,09 \pm 0,24 \text{ GeV}/c^2$	0

Hadrony

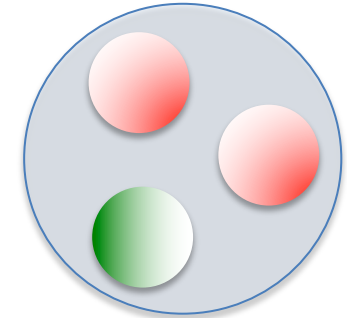


kwark górny „up” [$q = 2/3$]

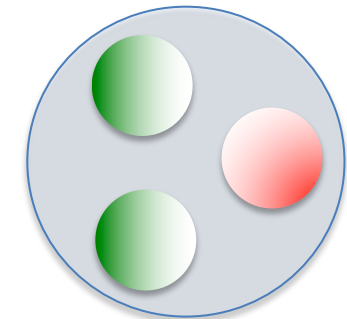


kwark dolny „down” [$q = - 1/3$]

spin $1/2$



proton



neutron

Hadrony



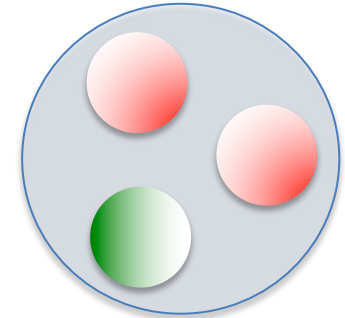
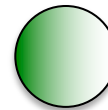
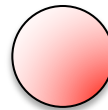
kwark górny „up” [$q = 2/3$]



kwark dolny „down” [$q = -1/3$]

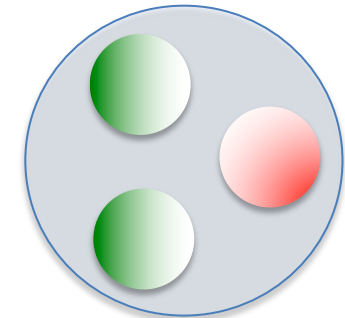
spin $1/2$

antykwariki

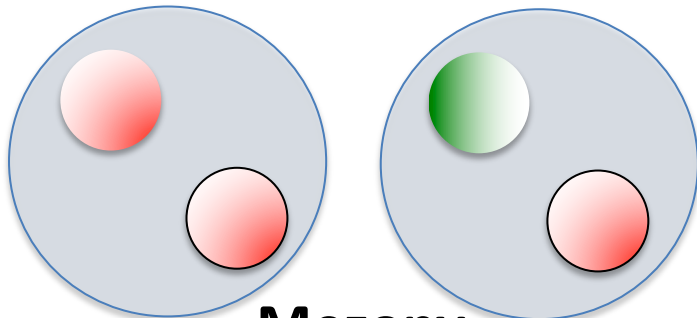


proton

Bariony



neutron



Mezony

Hadrony

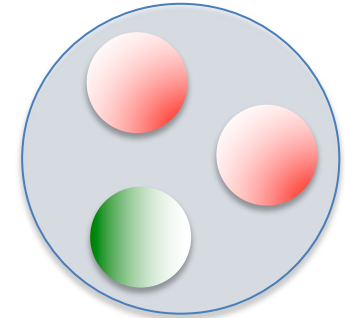


kwark górny „up” [$q = 2/3$]



kwark dolny „down” [$q = - 1/3$]

spin $1/2$



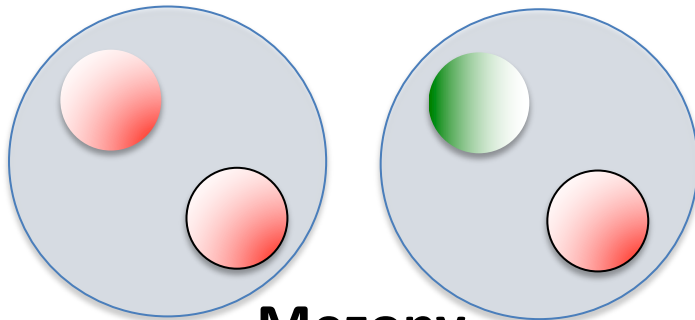
proton

Bariony

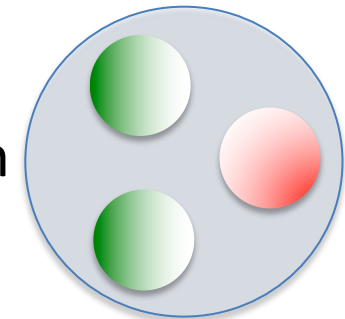
antykwariki



bariony inne niż p lub n
stany wielokwarkowe:
tetrakwarki
pentakwarki
.....



Mezony



neutron

Oddziaływania silne – gluony

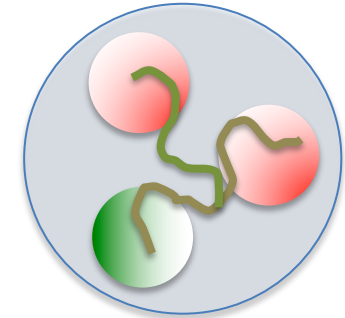


kwark górny „up” [$q = 2/3$]



kwark dolny „down” [$q = -1/3$]

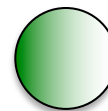
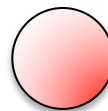
spin $1/2$



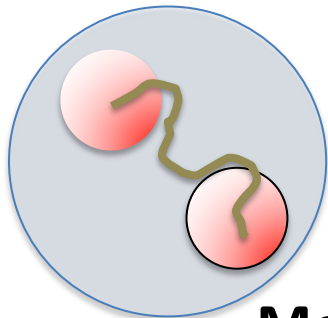
proton

Bariony

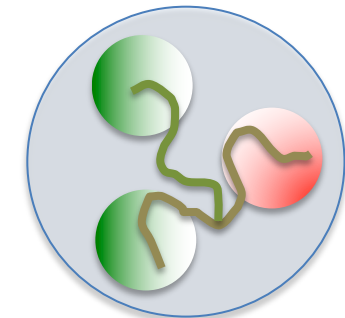
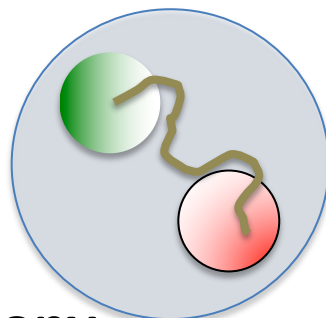
antykwariki



gluon:
elektrycznie neutralny
ma ładunek „silny”
samoddziałuje
spin 1



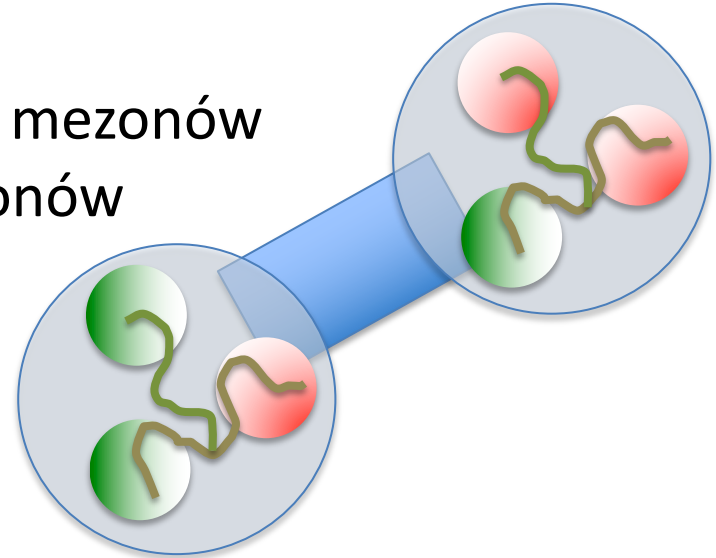
Mezony



neutron

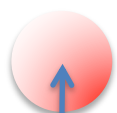
Oddziaływania jądrowe

wymiana mezonów
a nie gluonów



Składniki materii, oddziaływania

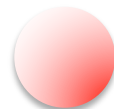
rozpad beta



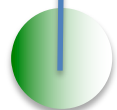
u [$q = 2/3$]
3 MeV



c
1 275



t
173 000



d [$q = -1/3$]
5 MeV



s
95



b
4 660

spin 1/2



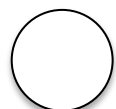
e [$q = 1$]
0.5 MeV



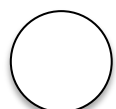
μ
105



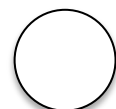
τ
1 777



ν_e [$q = 0$]
?



ν_μ
?



ν_τ
?

0, 80 000, 71 000, 0

spin 0

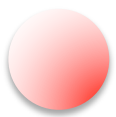

foton (γ), W^\pm , Z^0 , gluony, **grawitacja**

bozon Higgsa

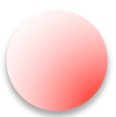
spin 1


125 000

Składniki materii, oddziaływania

 **u** [$q = 2/3$]
 3 MeV
 **d** [$q = -1/3$]
 5 MeV

symetria SU(2) (izospin), skąd się bierze masa


 **c**
 1 275

 **t** nukleonu (1 000)?
 173 000

 **s**
 95

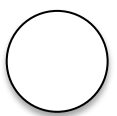
 **b**
 4 660

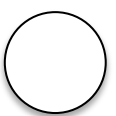
spin 1/2

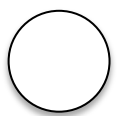
 **e** [$q = 1$]
 0.5 MeV

 **μ**
 105

 **τ**
 1 777

 **ν_e** [$q = 0$]
 ?

 **ν_μ**
 ?

 **ν_τ**
 ?

0, 80 000, 71 000, 0

spin 0

foton (γ), W^\pm , Z^0 , gluony, **grawitacja**

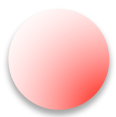
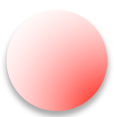







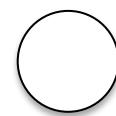
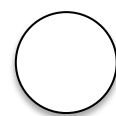
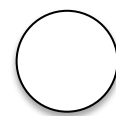
bozon Higgsa

spin 1

125 000

Składniki materii, oddziaływania

symetria SU(3) (flavor)

	u [$q = 2/3$] 3 MeV		c 1 275		t 173 000	
	d [$q = -1/3$] 5 MeV		s 95		b 4 660	
	e [$q = 1$] 0.5 MeV		μ 105		τ 1 777	spin 1/2
	ν_e [$q = 0$] ?		ν_μ ?		ν_τ ?	
0,	80 000,	71 000,	0			spin 0
foton (γ), W^\pm, Z^0, gluony, grawitacja						bozon Higgsa
spin 1						125 000

Składniki materii - podsumowanie

- Trzy generacje (rodziny): dwa kwarki, lepton i neutrino – fermiony
- Antycząstki
- Oddziaływania: wymiana cząstek wektorowych: γ , W^\pm i Z^0 oraz G
- Bozon Higgsa konieczny dla nadania mas W^\pm i Z^0
- Masy fermionów nadawane są także przez bozon Higgsa

Model Standardowy

Otwarte problemy:

- Dlaczego proton i elektron mają ten sam ładunek (co do znaku)?
- Jak wytłumaczyć hierarchię mas fermionów?
- Czy istnieją inne cząstki (nowa fizyka, tzw. BSM) – kosmologia?

Składniki materii - podsumowanie

- Trzy generacje (rodziny): dwa kwarki, lepton i neutrino – fermiony
- Antycząstki
- Oddziaływania: wymiana cząstek wektorowych: γ , W^\pm i Z^0 oraz G
- Bozon Higgsa konieczny dla nadania mas W^\pm i Z^0
- Masy fermionów nadawane są także przez bozon Higgsa

Model Standardowy

Otwarte problemy:

- Dlaczego proton i elektron mają ten sam ładunek (co do znaku)?
- Jak wytłumaczyć hierarchię mas fermionów?
- Czy istnieją inne cząstki (nowa fizyka, tzw. BSM) – kosmologia?

Jesteśmy w przełomowym momencie: brak pewnych przewidywań, jak ma wyglądać nowa fizyka, czego szukać. Ograniczenia finansowe.