

Cząstki i siły

tworzące nasz wszechświat

Piotr Traczyk

IPJ Warszawa

Plan

- Wstęp
- Klasyfikacja cząstek elementarnych
- Model Standardowy

Wstep

Jednostki, konwencje

- Prędkość światła $c \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- Stała Plancka $\hbar = h/2\pi = 1,055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- $E = mc^2$
- $p = \gamma mv$
- Jednostka energii: 1 eV (elektronowolt)
energia kinetyczna elektronu przyspieszonego
potencjałem 1 V
 $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Jednostki, konwencje (HEP)

- Prędkość światła $c = 1$
- Masy, energia i pęd mierzone w eV

- $E = mc^2 \rightarrow E = m$

- $p = \gamma m v \rightarrow p = \gamma m \beta$

- Przykłady:

- Masa elektronu
- Masa protonu
- Masa kwarku top
- Energia zderzenia pp w LHC
- Energia lecącego komara

Potęga 10	Liczba	Symbol
10^{-12}	0.000 000 000 001	p (piko)
10^{-9}	0.000 000 001	n (nano)
10^{-6}	0.000 001	μ (mikro)
10^{-3}	0.001	m (mili)
10^0	1	
10^3	1 000	k (kilo)
10^6	1 000 000	M (mega)
10^9	1 000 000 000	G (giga)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)

$$m_e \sim 0,5 \text{ MeV}$$

$$m_p \sim 1 \text{ GeV}$$

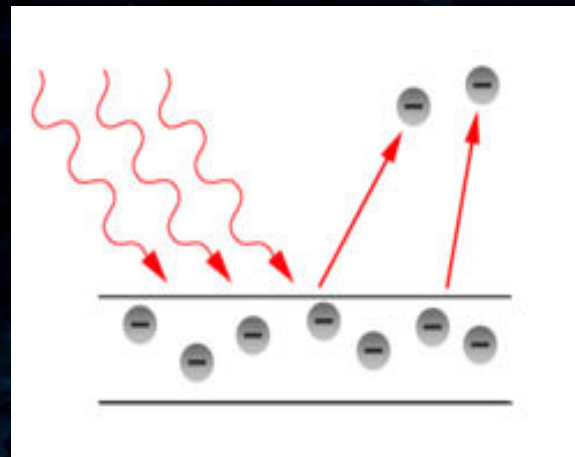
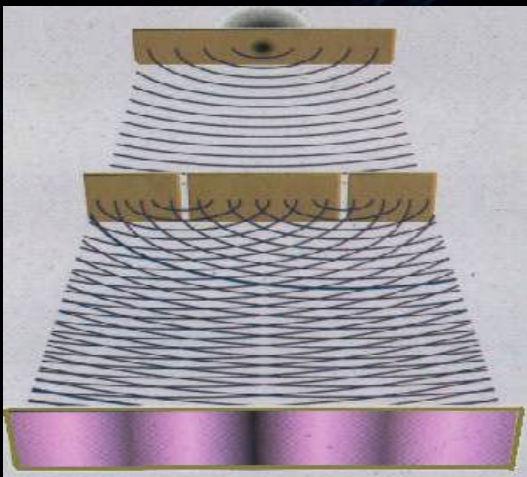
$$m_t \sim 175 \text{ GeV}$$

$$E_{\text{LHC}} \sim 14 \text{ TeV}$$

$$E_{\text{komar}} \sim 1 \text{ TeV}$$

Mechanika Kwantowa (1)

- Dualizm korpuskularno-falowy: $\lambda = h/p$
(Louis de Broglie, 1924)
- Popularny przykład - światło, doświadczenie Younga vs zjawisko fotoelektryczne



- Ale na tym nie koniec! „paradoks” dotyczy nie tylko fotonów...

Elektrony jako fale

- 1927 r. - dyfrakcja elektronów na kryształach, C. J. Davisson, L. H. Germer, (Nobel w 1937 r.)
- 1957 r. - doświadczenie Younga dla elektronów, J. Faget, C. Fert



- **UWAGA!** Elektrony przelatują przez szczeliny pojedynczo - z czym interferuje pojedynczy elektron...?
- To nie koniec tematyki - pozostają doświadczenia z innymi cząstkami, efekt Aharonova-Bohma, ...

Klasyfikacja cząstek



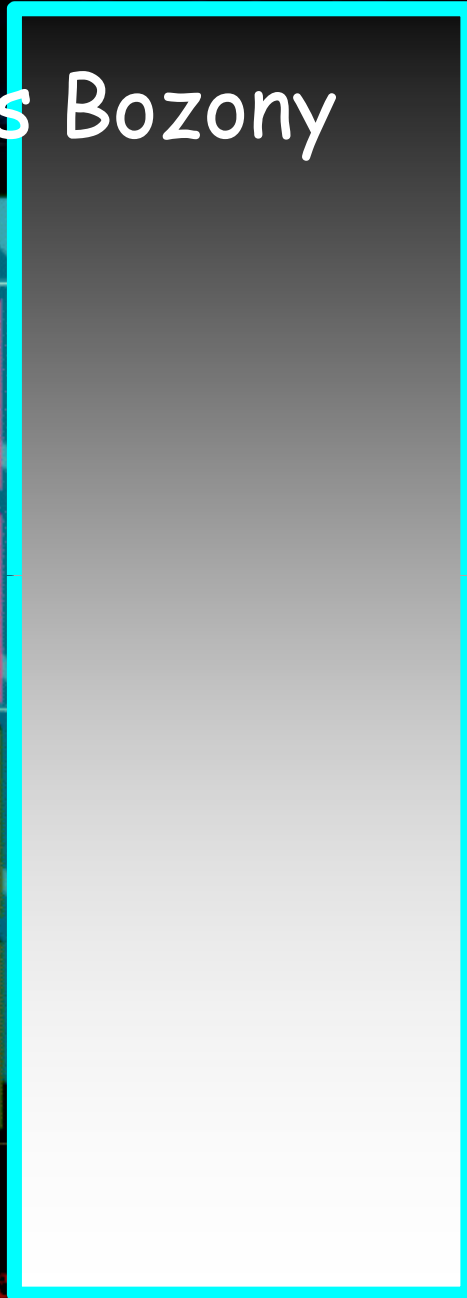
Pierwsze kryterium

- Podział ze względu na spin - całkowity czy połówkowy
- Spin całkowity - bozony
- Spin połówkowy - fermiony

Klasyfikacja cząstek

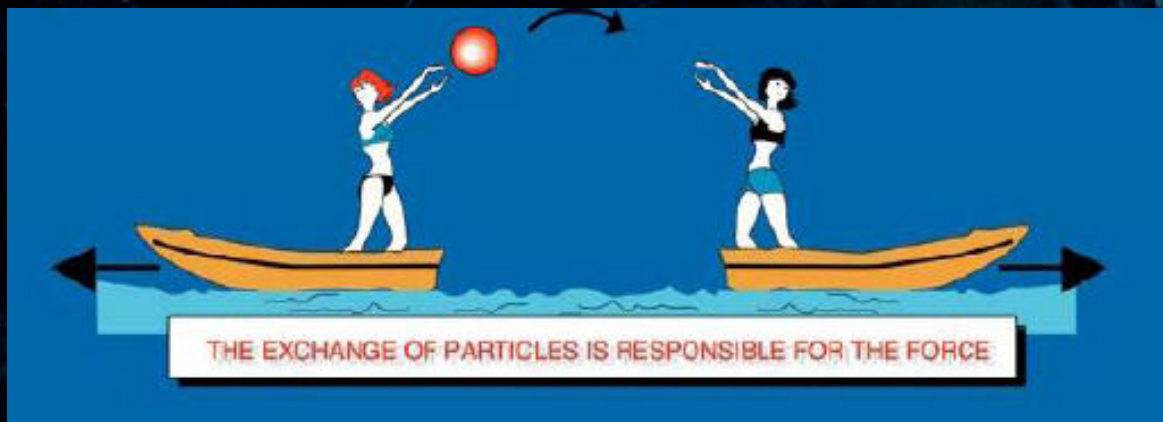
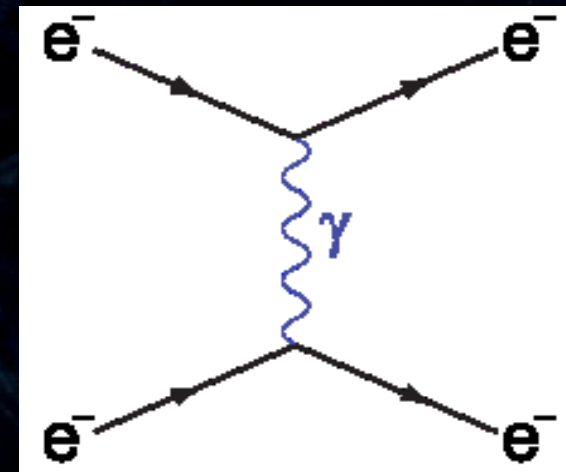
Fermiony vs Bozony

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
	Three Generations of Matter		



Bozony - nośniki oddziaływań

- Jak opisujemy oddziaływania w świecie cząstek?
- Przykład: rozpraszania elektronów zachodzi przez wymianę fotonu
- Pytanie: skąd elektron wie, że ma wysłać foton?
- Odpowiedź: nie wie, więc robi to bez przerwy...



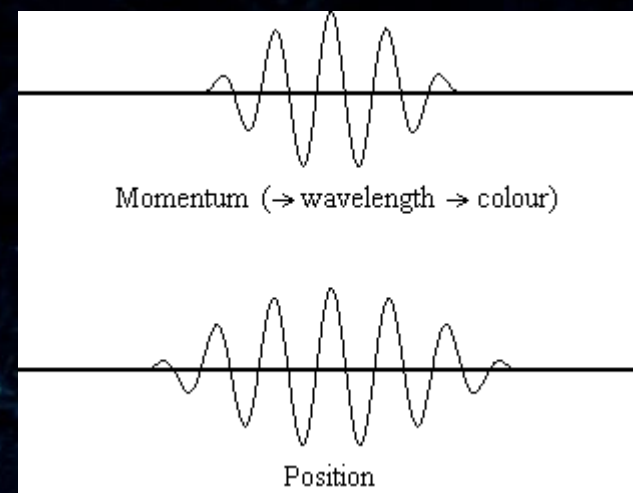
Mechanika Kwantowa (2)

- Zasada nieoznaczoności Heisenberga:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

- Nie można jednocześnie zmierzyć pędu i położenia cząstki z dowolną dokładnością
- Analogia - położenie i częstotliwość fali

$$\lambda = h/p$$

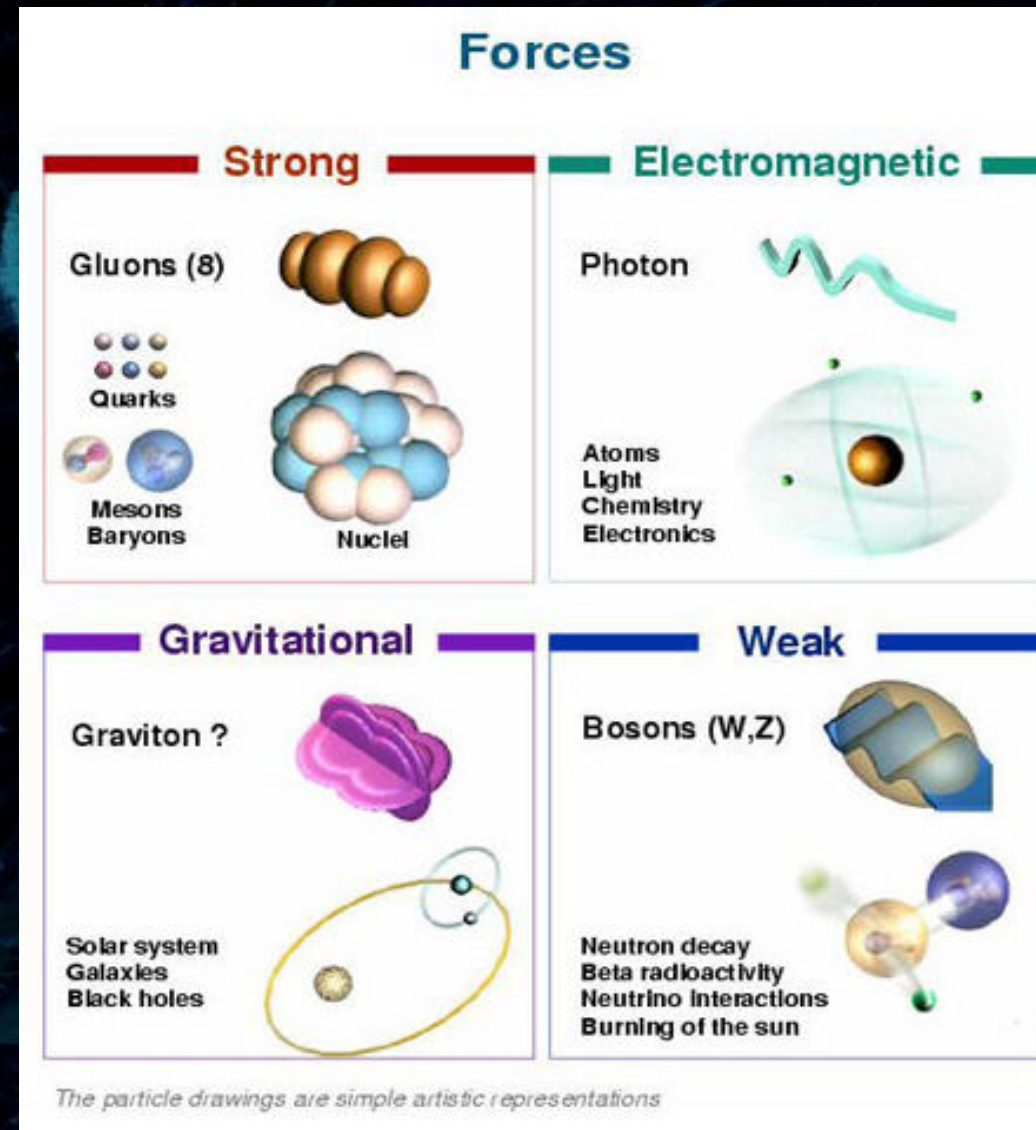


Cząstki wirtualne

- Inna postać zasady nieoznaczoności: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$
- Elektron otoczony chmurą wirtualnych fotonów - cząstek powstałych „na kredyt”
- Zasada zachowania energii + zasada nieoznaczoności -> Czas przez który taki foton może istnieć jest związany z jego energią == prawo Coulomba
- Jeśli wirtualny foton trafi na elektron, następuje przekaz pędu - oddziaływanie

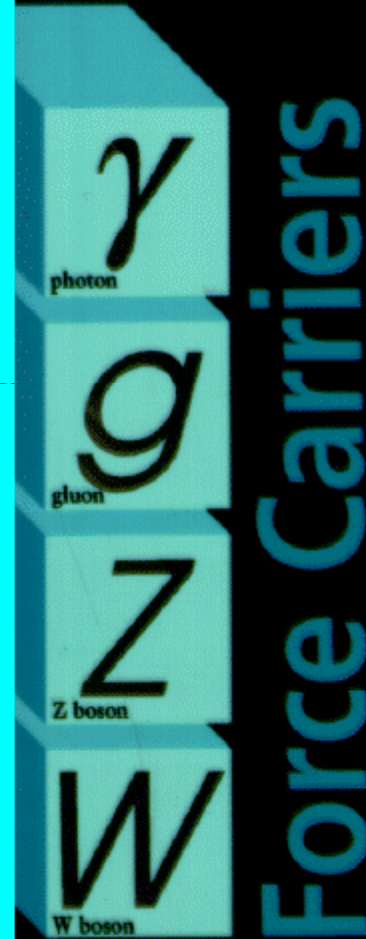
Oddziaływania elementarne

- Silne
8 gluonów
- Elektromagnetyczne
1 foton
- Słabe
3 bozony W^+ W^- Z^0
- Grawitacja
1 grawiton (?)



Klasyfikacja cząstek

Fermiony vs Bozony



Drugie kryterium - czy oddziałują silnie

Nie

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Tak

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

Fermiony - składniki materii

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

- Punktowe (?)
- Oddziaływanie - słabe, elektromagnetyczne (tylko naładowane) i grawitacyjne
- Obserwowane bezpośrednio bądź pośrednio (neutrino)
- Trzy rodziny, jedyna różnica - masa

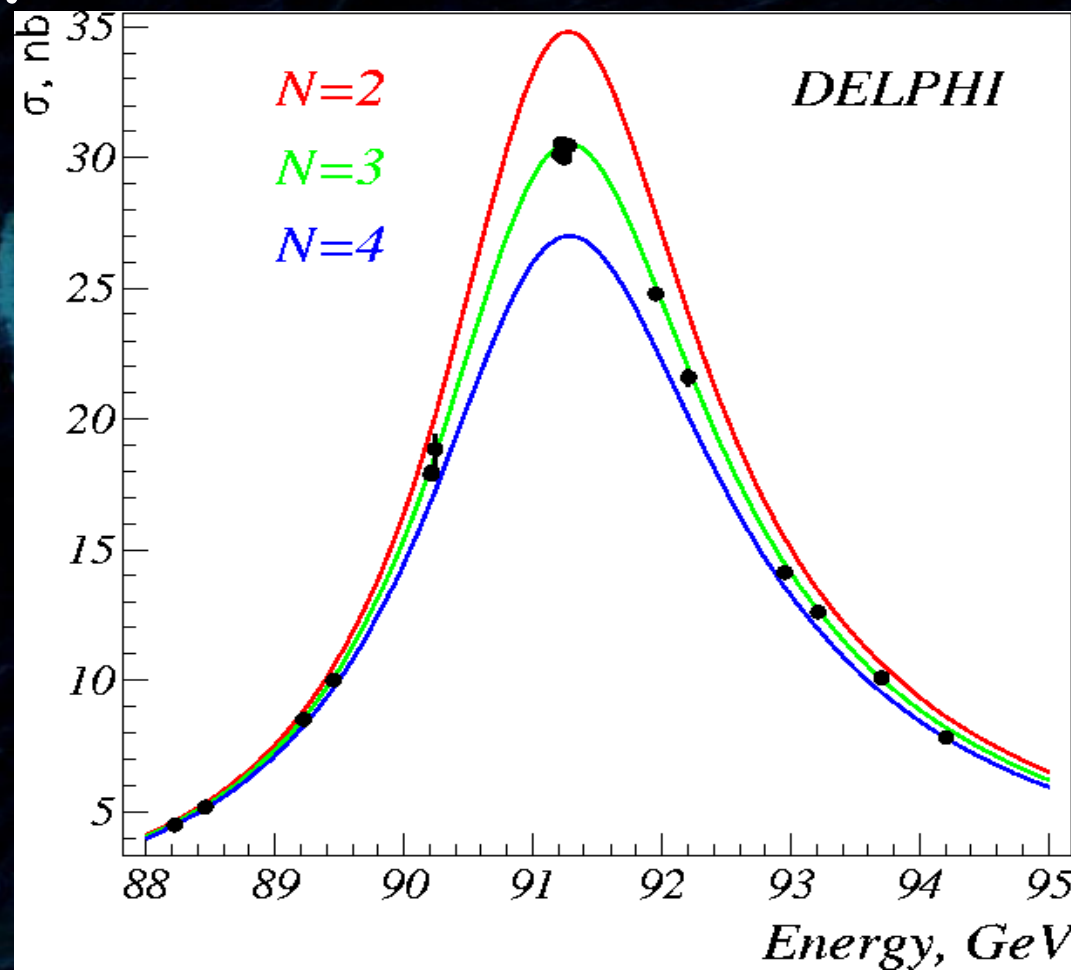
Fermiony - składniki materii

- Punktowe (?)
- Oddziaływanie - słabe, elektromagnetyczne, silne i grawitacyjne
- Nie występują samodzielnie
- Trzy rodziny, jedyna różnica - masa

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
U up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
C charm	1.3	2/3
S strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

Trzy rodziny fermionów

- Dokładną liczbę rodzin fermionów zmierzono w doświadczeniach przy akceleratorze LEP
- Oczywiście przy pewnych założeniach...
- Dokładniej: zmierzono liczbę rodzin lekkich, oddziałujących słabo neutron



$$N_{\text{rodzin}} = 2.994 \pm 0.012$$

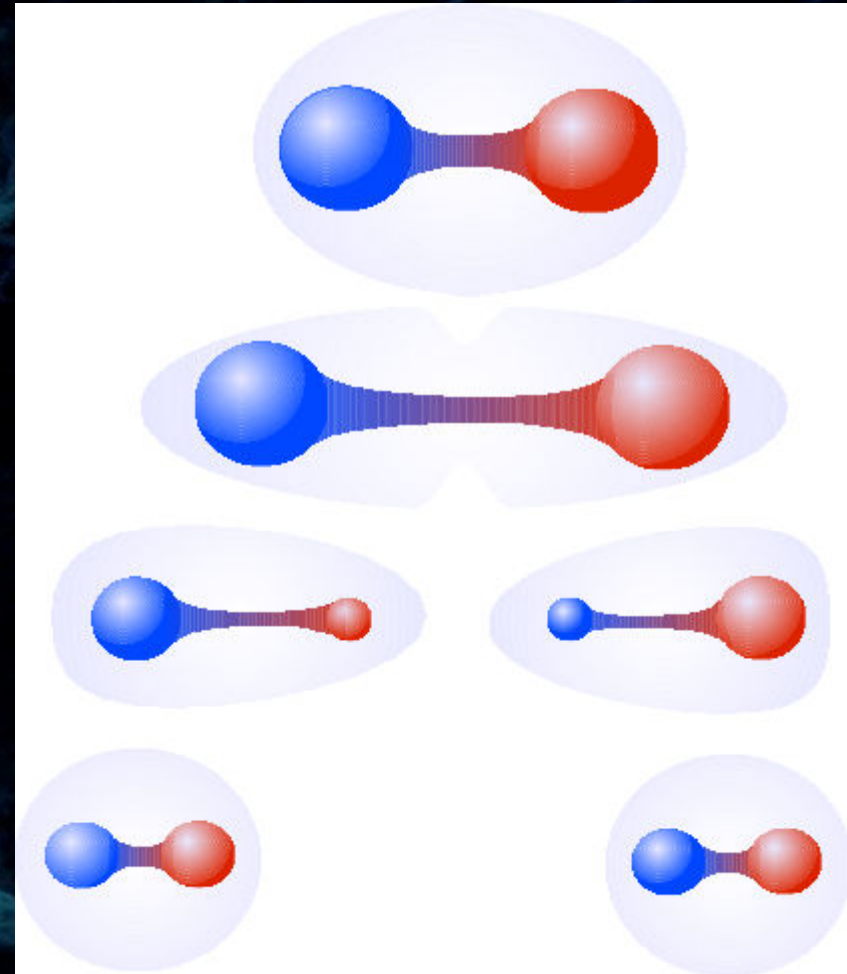
Hadrony - cząstki zbudowane z kwarków

- Ładunek silny kwarków - Kolor (RGB)
- Cząstki utworzone z kwarków muszą być „kolorowo neutralne” - białe
- Dwie możliwości:
 - Trzy kwarki o różnych kolorach - bariony. Np. Proton, neutron.
 - Para kwark-antykwar - mezony.

Uwaga - mezony mają spin całkowity więc są bozonami. Ale nie są to już cząstki elementarne.

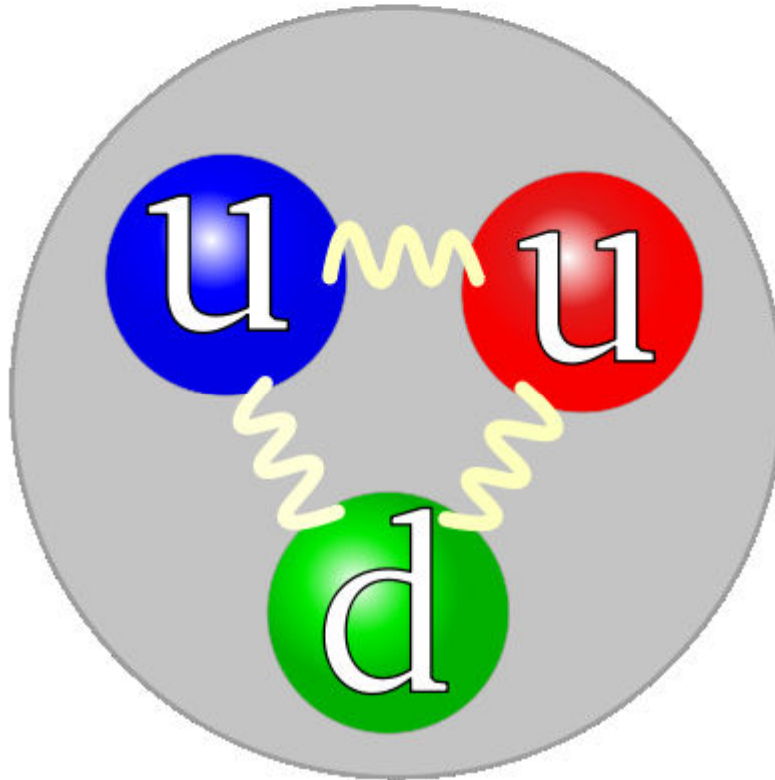
O uwięzieniu kwarków

- Oddziaływania silne nie słabną wraz z odległością (!)
- Siła \sim stała powyżej pewnej odległości
- Więc energia potencjalna rośnie, około 1 GeV/fm
- W końcu energii wystarcza na kreację np. pary kwark-antykwar



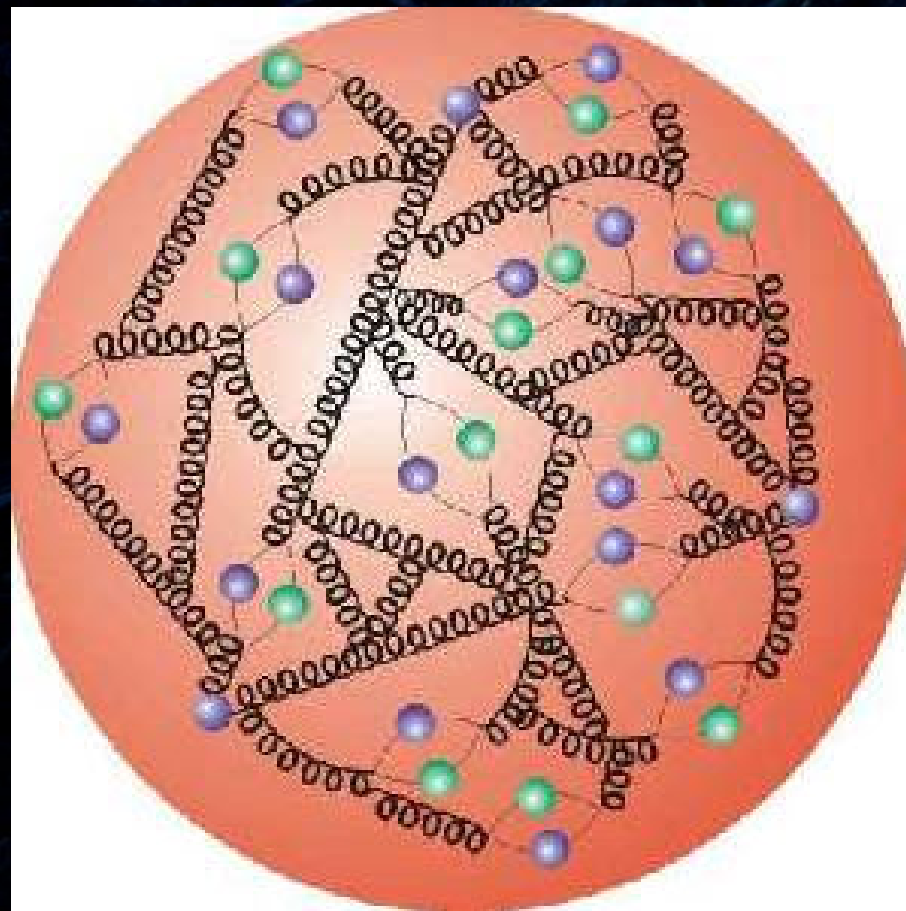
Budowa Protonu

Ładunek $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$



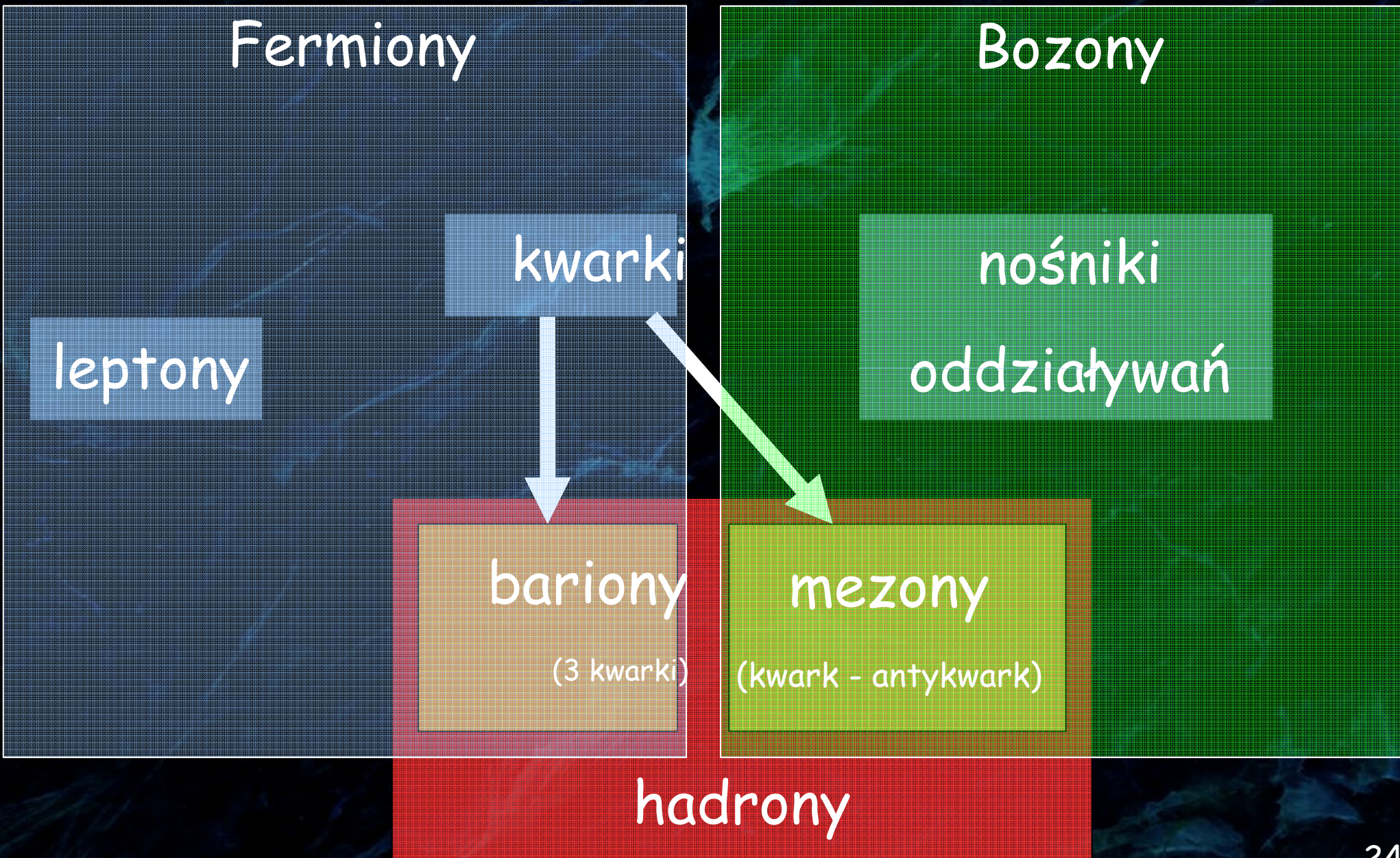
Z daleka...

Budowa Protonu



Z bliska.

Klasyfikacja - podsumowanie



Model Standardowy

- Matematyczny opis - kwantowa teoria pola
- Rozwinięty w latach '70 poprzedniego stulecia
- Oddziaływania elektroslabe + chromodynamika kwantowa (QCD - oddziaływania silne)
- Bardzo dobrze zgodny z doświadczeniem, kilka spektakularnych sukcesów - odkrycie bozonów W i Z (1983 CERN), kwarku top (1995 Fermilab)
- A jednak fizycy wciąż szukają dziury w całym...

Problemy Modelu Standardowego

Typ I - opisuje ale nie wyjaśnia

- Masy cząstek, siły oddziaływań itp.
- Dlaczego trzy rodziny fermionów
- ładunek protonu = - ładunek elektronu

Problemy Modelu Standardowego

Typ II - braki i niezgodności

- Masy cząstek - nie potwierdzony doświadczalnie mechanizm Higgsa (jutro)
- Ciemna materia (czwartek)
- Asymetria materia-antymateria
- Grawitacja - całkowicie pominięta

Problemy Modelu Standardowego

Typ III - pasuje do danych

- Bezpośrednie pomiary jak dotąd całkowicie zgodnie z modelem (patrz trzy slajdy wstecz)

Silne przesłanki, że coś chowa się tuż za rogiem...

Podsumowanie: sytuacja na początek 2008 r.

- Model Standardowy - opisuje 3 z 4 znanych fundamentalnych oddziaływań
- Cząstki elementarne
 - 2x6 kwarków
 - 2x6 leptonów
 - 12 bozonów przenoszących oddziaływania
- Bardzo dobrze zgodny z doświadczeniem, ale...

