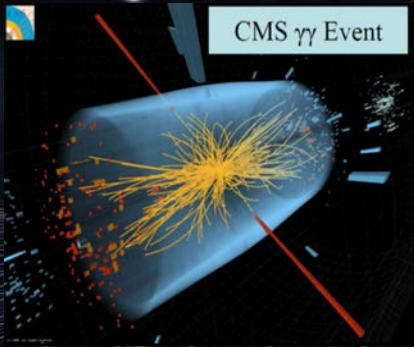


Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 3

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

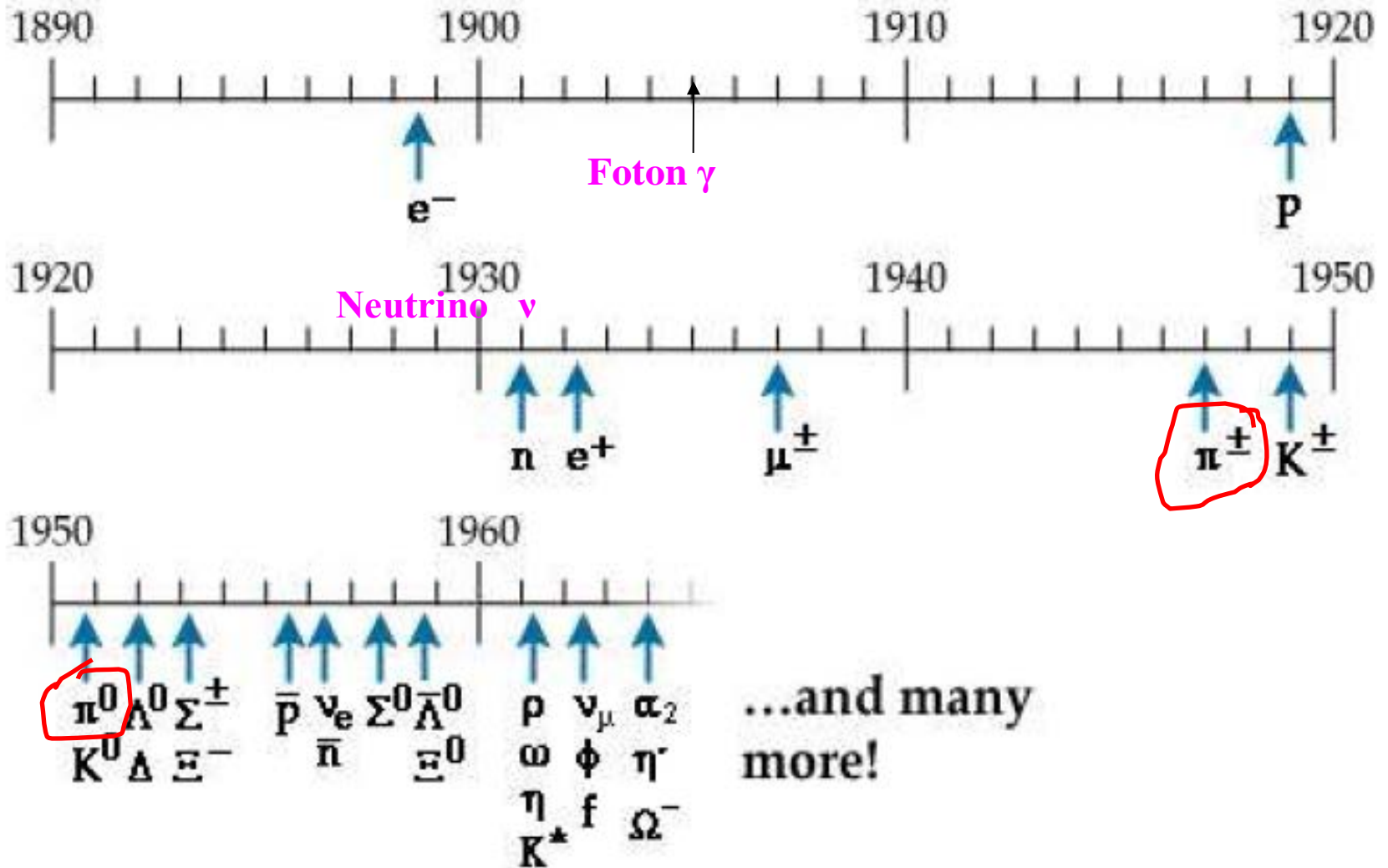
Masy i czasy życia cząstek elementarnych

Kwarki: zapach i kolor

Prawa zachowania i liczby kwantowe:

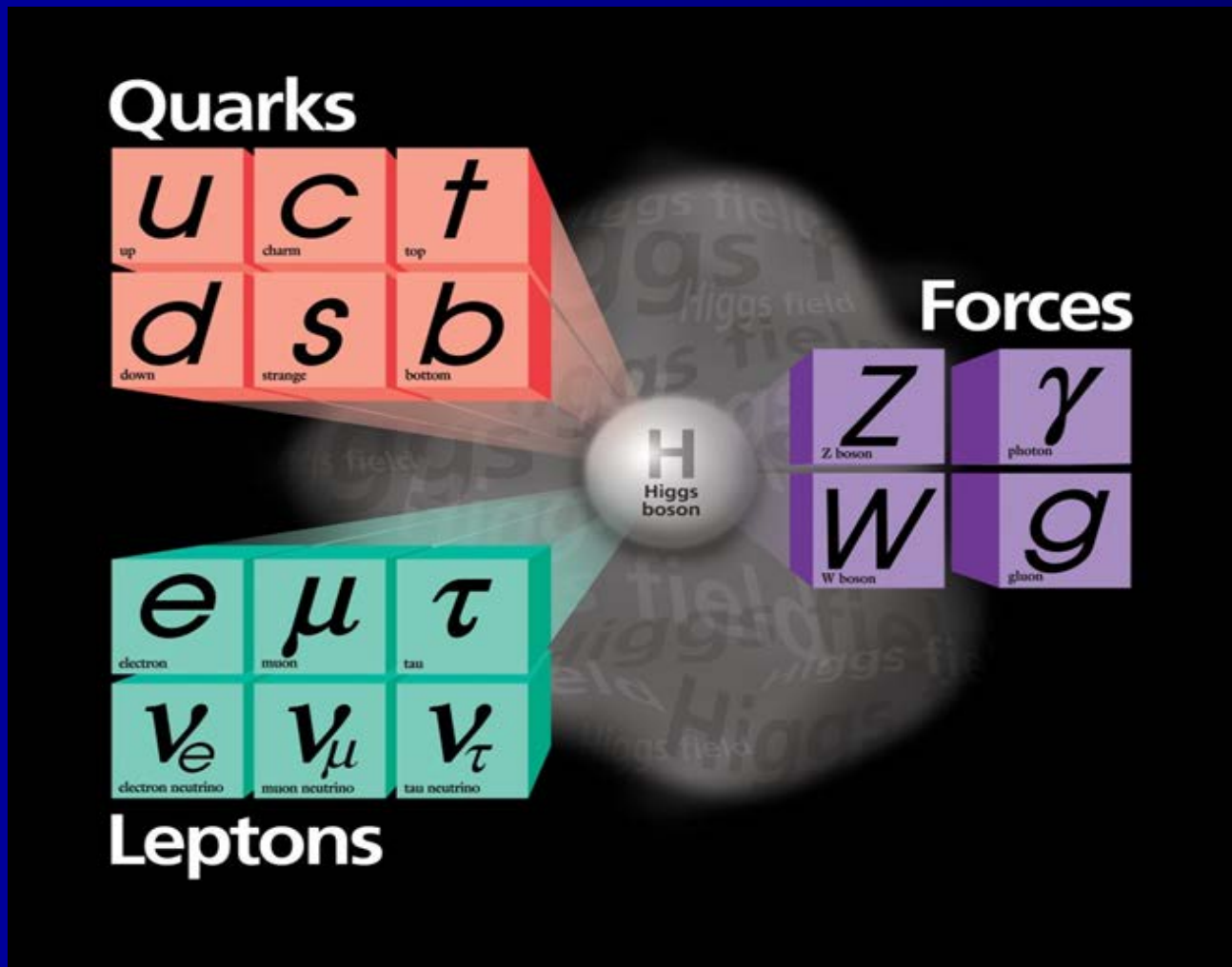
liczba barionowa i liczby leptonowe

Odkrycia cząstek elementarnych 'potop' w latach 50-60 XX w



Cząstki fundamentalne

kwarki, leptony, bozony $W/Z/\gamma/g$, H



Ogólne własności cząstek elementarnych

Masy cząstek elementarnych

$E=mc^2$, jednostka masy = eV/c^2

Neutrino ~ 0 ? zwykle pomijamy stały czynnik c^2

Elektron ~ 0.5 MeV

Pion-zbudowany z kwarków i antykwarków u, d) ~ 140 MeV

Proton, neutron (uud, ddu) ~ 1 GeV

Istnieją cząstki znacznie masywniejsze niż proton

Pochodzenie mas cząstek – **mechanizm BEH! (2012)**

Czy masa cząstki = suma mas składników?

Bywa, ale np. tak **nie jest** dla nukleonów, pionów

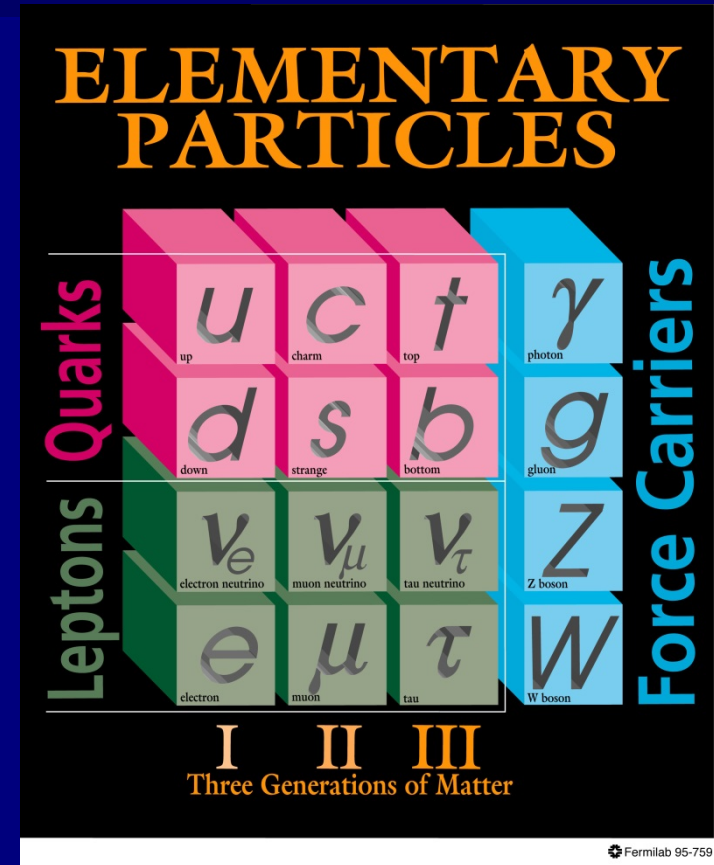
tu masa pochodzi z silnego oddziaływania:

$$m = E / c^2 \text{ (wkład od mas kwarków jest znikomy)}$$

Masy kwarków i leptonów

■ Masy:

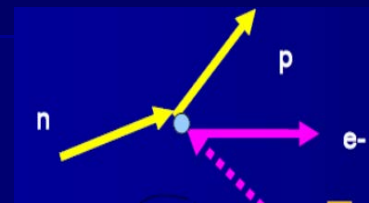
u	c	t
3 MeV	1.25 GeV	172 GeV
d	s	b
7 MeV	150 MeV *	4.5 GeV
ν_e	ν_μ	ν_τ
$<5 \cdot 10^{-6}$ MeV	<0.27 MeV	<31 MeV
e	μ	τ
0.511 MeV	105.7 MeV	1.78 GeV



Rozpady cząstek elementarnych

Rozpad cząstki to **swobodne** przejście do innego stanu (to nie jest rozpad na składniki cząstki złożonej, ale przeorganizowanie składu)

Np. **rozpad neutronu czyli rozpad β** :



neutron (ddu) \rightarrow proton (uud) elektron i 'coś'

(czas życia swobodnego neutronu 886 s = 14,8 min)

1914 J. Chadwick: w rozpadzie β energia elektronu zmienna, więc to nie może być rozpad na dwie cząstki
(z prawa zachowania energii i pędu)

N. Bohr – może energia się nie zachowuje?

W. Pauli 1931 (*..bez wiary*) - może 'coś' bez masy i ładunku

E. Fermi 1932 - nazwa **neutrino** (*włoski: neutralne maleństwo*)

Czasy życia cząstek elementarnych

Czas życia układu to (w przybliżeniu) czas po którym połowa układów danego typu pozostaje

(dokładniej: *średni czas życia* $\rightarrow 1/e$ ($e=2.7$) układów zostaje)

- Czasy życia cząstek elementarnych (ozn. τ)

Wiek Wszechświata 13,7 mld lat

- cząstki trwałe (naj...):

elektron: $\tau > 4.6 \cdot 10^{26}$ lat i proton: $\tau > 10^{30}$ lat

-cząstki rozpadające się bardzo szybko $\sim 10^{-24}$ s

-cząstki rozpadające się powoli: $10^{-6} - 10^{-8}$ s

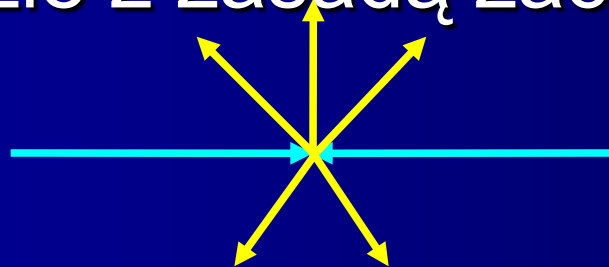
(np. mion $2 \cdot 10^{-6}$ s, piony naładowane $2.6 \cdot 10^{-8}$ s)

Prawdopodobieństwo rozpadu małe, gdy czas życia długi i odwrotnie (silne oddz. \rightarrow krótkie czasy życia)

Produkcja cząstek elementarnych

W zderzeniach cząstek może nastąpić produkcja dwóch, trzech,..N cząstek

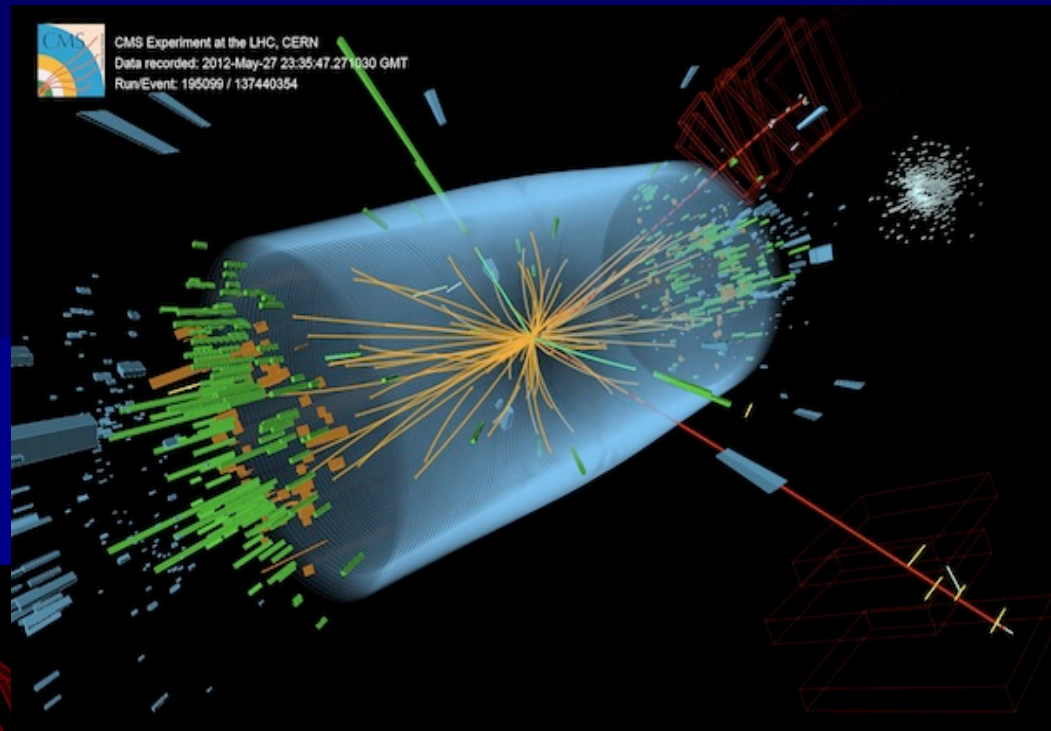
- zawsze w zgodzie z zasadą zachowania energii i pędu



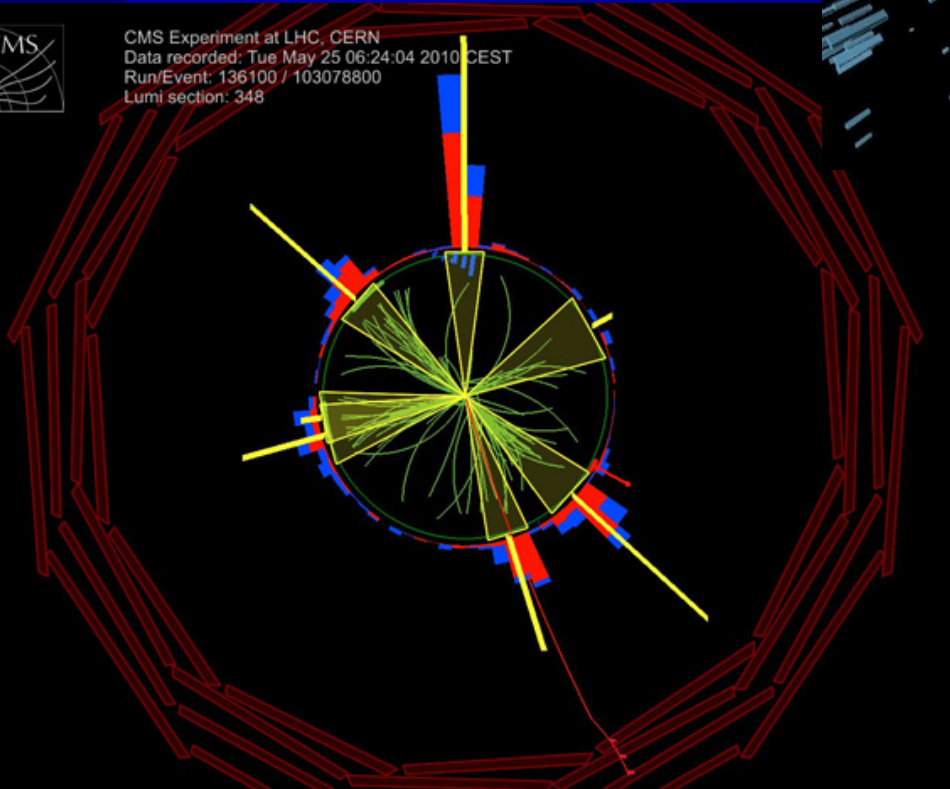
Energia zderzenia może się zamienić całkowicie na energię spoczynkową jednej nowej cząstki, zgodnie z $E=mc^2$ - to produkcja **rezonansowa** :



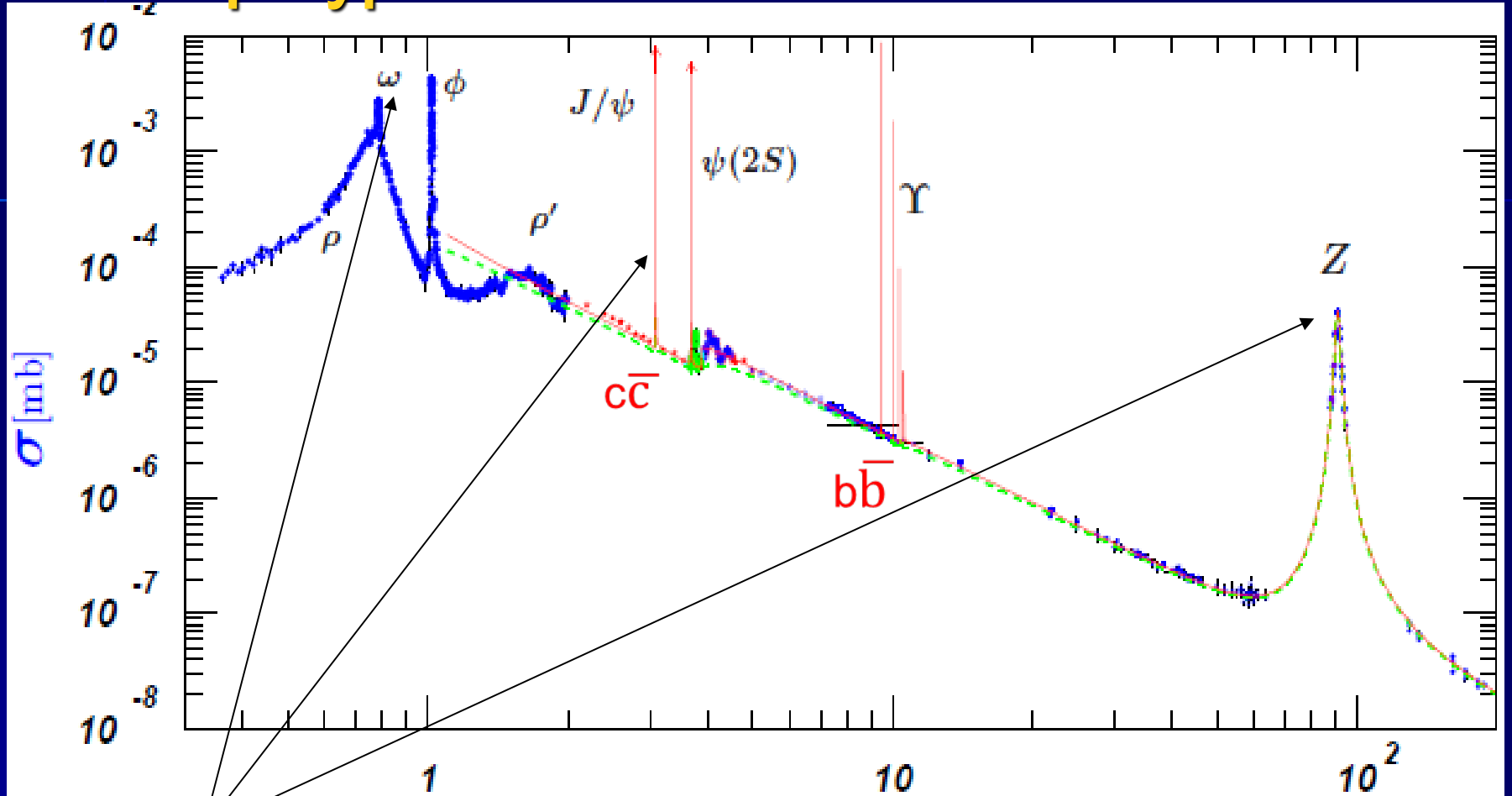
CMS at LHC



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue May 25 06:24:04 2010 CEST
Run/Event: 136100 / 103078800
Lumi section: 348



Liczba przypadków w zderzeniach e^+e^-



Rezonanse: dla różnych energii zderzenia (GeV)

energia zderzenia (GeV) = masa cząstki $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$

szerokość linii rezonansowej $\Gamma \sim 1/\tau$ (w połowie wysokości)

Typy (zapachy) kwarków

Zwykła materia i zwykłe kwarki

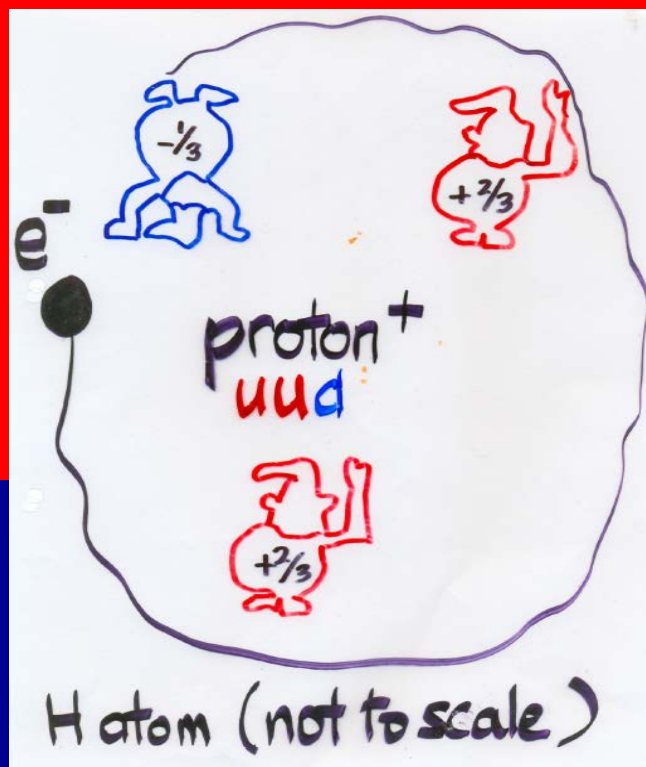
Life, ^{much} of the Universe, ^{but} not everything

Stable (ordinary) matter

- up-quark (charge $+2/3$)
- down-quark (charge $-1/3$)
- electron (charge -1)
- neutrino (no charge and \approx zero mass)

Zwykłe kwarki u (up) i d (down)

Najbardziej rozpowszechnione kwarki
w najbardziej rozpowszechnionych
cząstkach elementarnych p i n



H atom
(not to scale!)

**a miracle
of
neutrality**

**electron
balances**

uud

from Close

hint of unification

Różnica mas kwarku u i d

- Te kwarki tworzą proton (uud) i neutron (ddu)
Masy p i n: $m_p=938.3$ MeV , $m_n=939.6$ MeV, $\Delta m=1.3$ MeV
 - Różnicę mas n i p ($\Delta m=1.3$ MeV) interpretujemy jako różnicę mas kwarków d i u.
Z innych pomiarów → masa kwarków u i d – kilka MeV
(→ inna nazwa dla u i d - lekkie kwarki)
- Rozpad neutronu (na poziomie fundamentalnym)
→ rozpad kwarku d na kwark u
(+ elektron + antyneutrino elektronowe)

Kwark d – ma większą masę i rozpada się na cząstkę o mniejszej masie – i bardzo dobrze, bo...

Proton jest trwały, a neutron – nie, i dlatego

- Słońce świeci (rozpad neutronu)
- Woda istnieje (proton = jądro wodoru)

Rozpad neutronu to $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

Hipotetyczny rozpad protonu

(gdyby kwark u masywniejszy niż d)

np. $p \rightarrow n e^+ \nu_e$

Ale dlaczego proton się nie rozpada na inne cząstki?

Czy to naruszałoby jakąś zasadę? Wrócimy do tego.

Cząstki dziwne

Cząstki dziwne
odkryto w
promieniowaniu
kosmicznym
~ 1950 r

potem w
laboratoriach
-pierwszą K (kaon)



Cząstki dziwne

- czas życia znacznie dłuższy niż „podobnych” cząstek
- produkują się w zderzeniach nukleonów parami

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$
$$\tau \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

Porównaj z podobną cząstką

$$\Delta \rightarrow p + \pi^-$$
$$\tau \sim 10^{-23} \text{ s}$$

aby to opisać – wprowadzono nową „kategorię”
dziwność **S** (strangeness)

Dziwność

Cząstki **dziwne** mają cechę S (**dziwność** różną od zera);
wartości obserwowane S : 1, 2, 3.. (i ujemne)

nukleony= proton i neutron $S=0$

piony $S=0$

Zakładamy, że: dziwność dla układu cząstek sumuje się
(**addytywność**) i w niektórych procesach jest ona zachowana:

$$S_{\text{początkowa}} = S_{\text{końcowa}}.$$

Na poziomie fundamentalnym: kwark s – nośnik dziwności

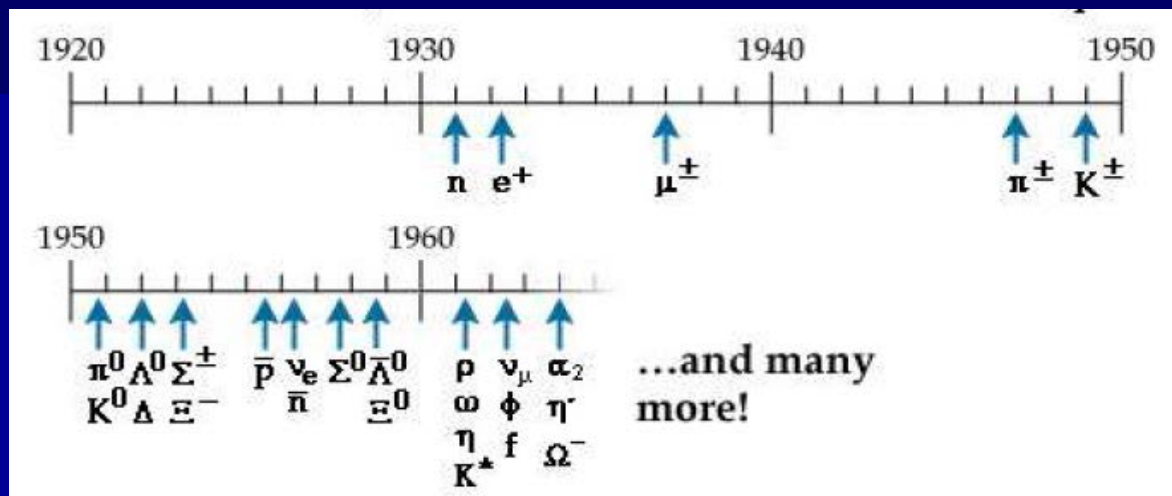
(przyjęto dla kwarku s wartość $S = -1$)

Najlżejsza cząstka elementarna zbudowana z jednego kwarku
dziwnego to kaon K (masa 500 MeV): $K^+ = u\bar{s}$, $K^- = \bar{u}s$, $K^0 = d\bar{s}$

Cząstka $\Lambda(1116 \text{ MeV}) = uds$.

→ Masa kwarku $s \sim 150 \text{ MeV}$.

Model kwarkowy



Lata 60-te XXw zaobserwowano grupy cząstek o podobnych masach (multiplety cząstek)

(→ *następny slajd*)

Gell-Mann i Zweig:

jakaś nowa symetria?...

hipoteza kwarków

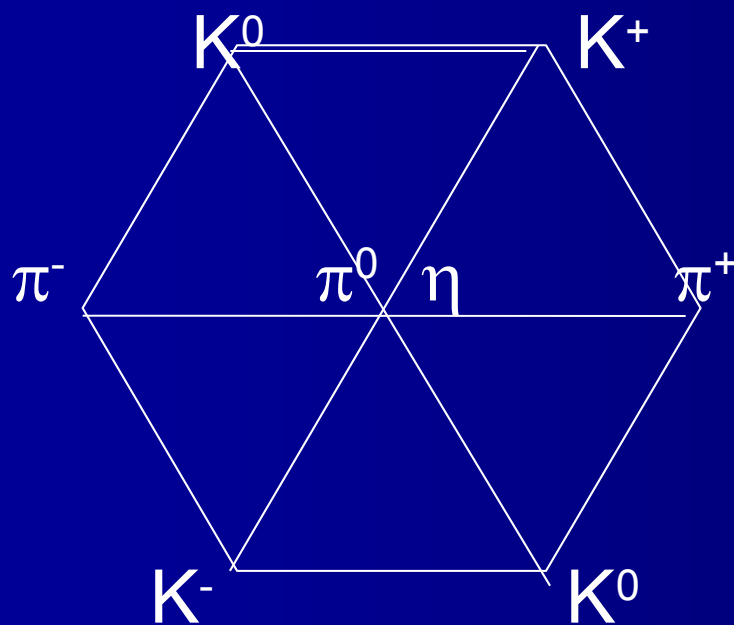
Multiplety cząstek elementarnych

-> diagramy kwarkowe...

Przykład:

oktet mezonów K , π i η masy ~ 500 MeV

dziwność S



+1

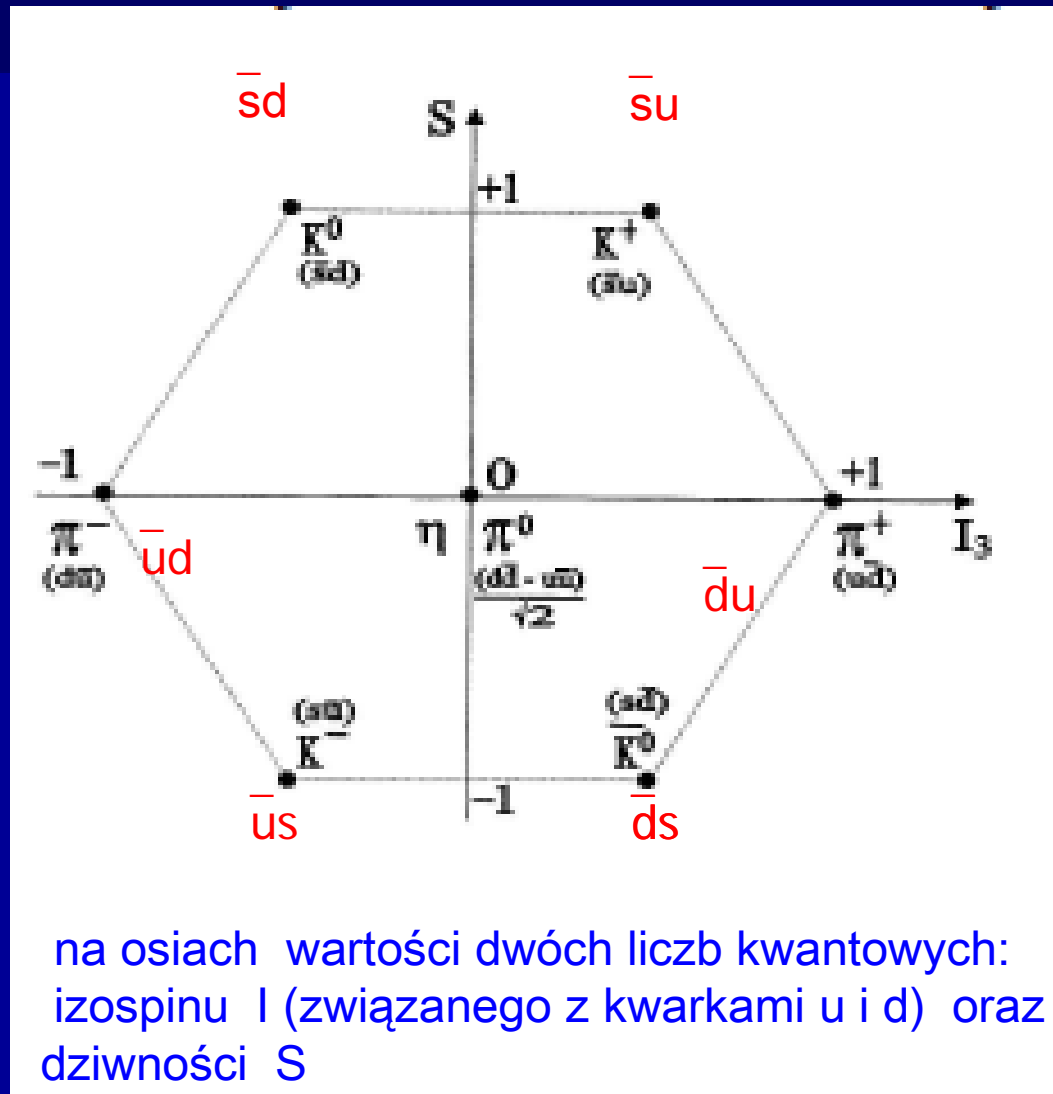
0

η' (skalar)

-1

isospin I : -1, $-\frac{1}{2}$, 0, $\frac{1}{2}$, 1

Multiplet cząstek ($q \bar{q}$)



Masy 140- 500 MeV

na osiach wartości dwóch liczb kwantowych:
 izospinu I (związanego z kwarkami u i d) oraz
 dziwności S

Bariony

- Oktet (o spinie $\frac{1}{2}$)

Dziwność $s=0,-1,-2$

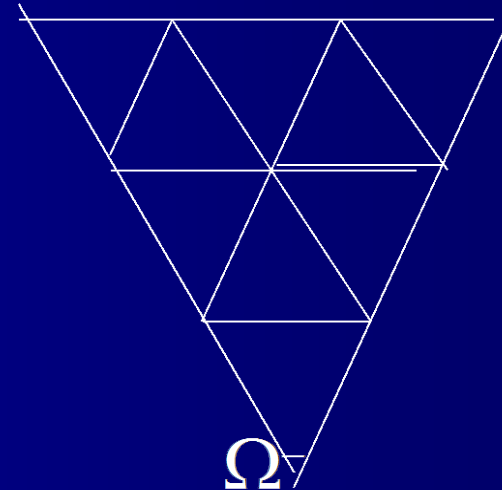
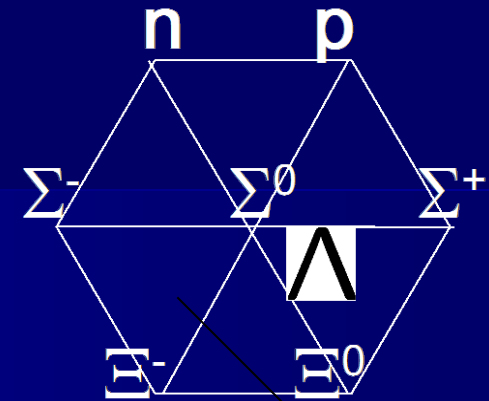
- Dekuplet o spinie $\frac{3}{2}$
tu stany typu sss , uuu , ddd
 Ω masa 1672.5 MeV

s

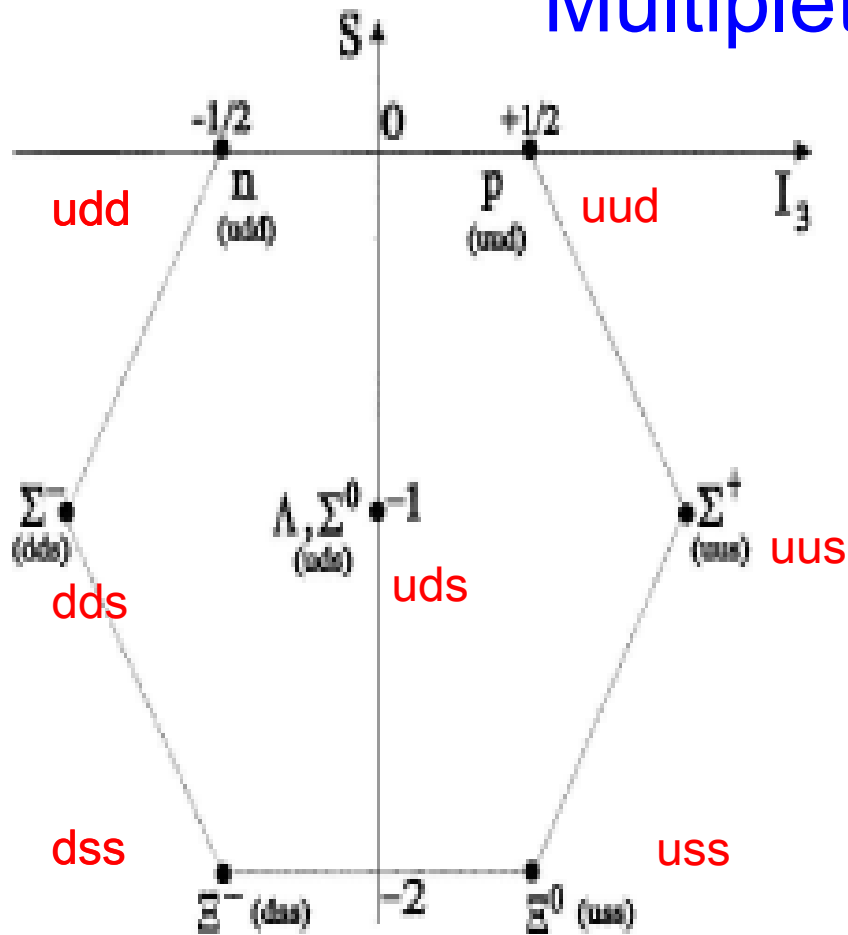
0

-1

-2



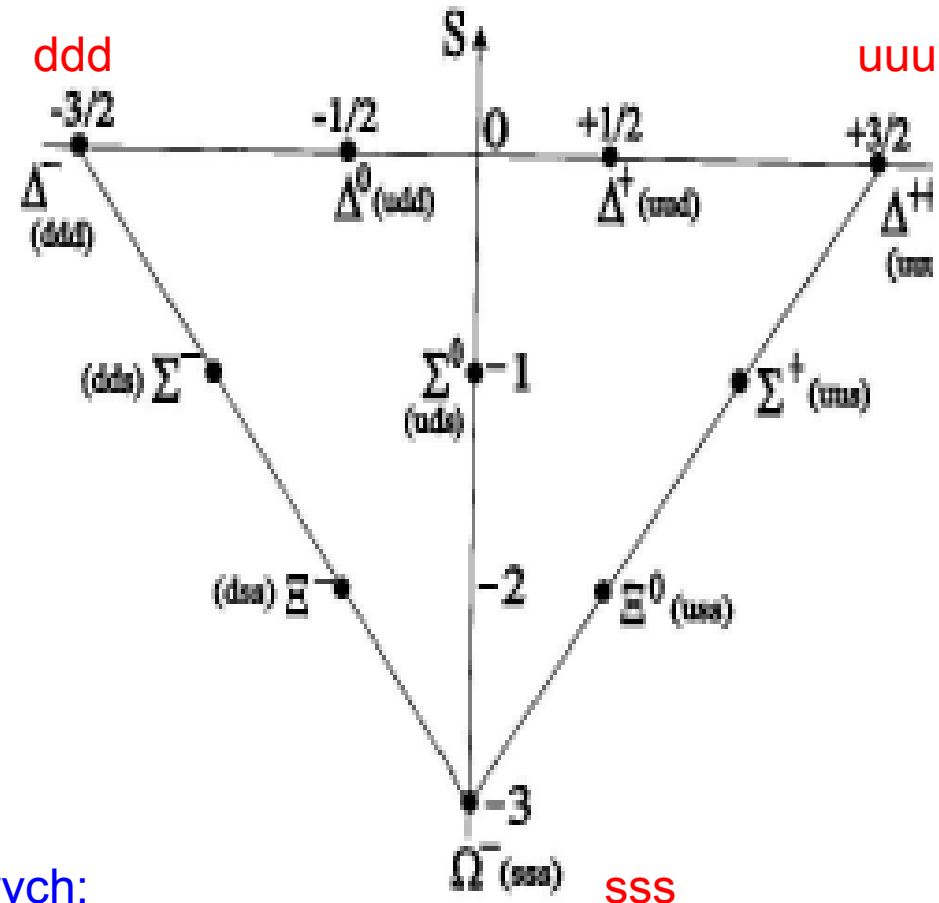
Multiplety cząstek



na osiach wartości dwóch liczb kwantowych:

izospinu I (związanego z kwarkami u i d) oraz dziwności S

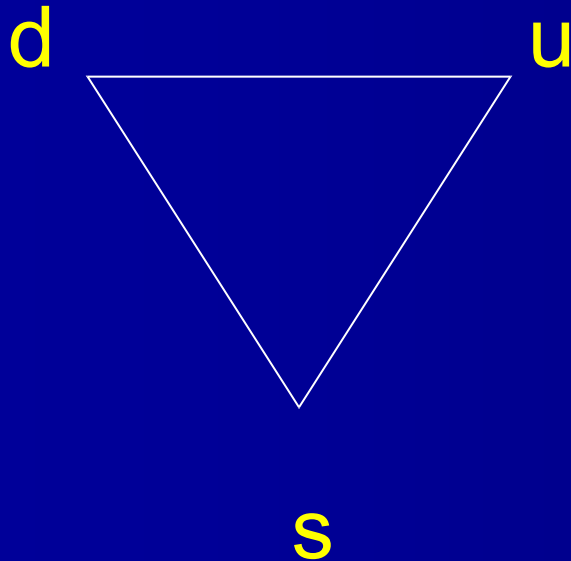
Masy ok 1 GeV



Masy ok 1.7 GeV

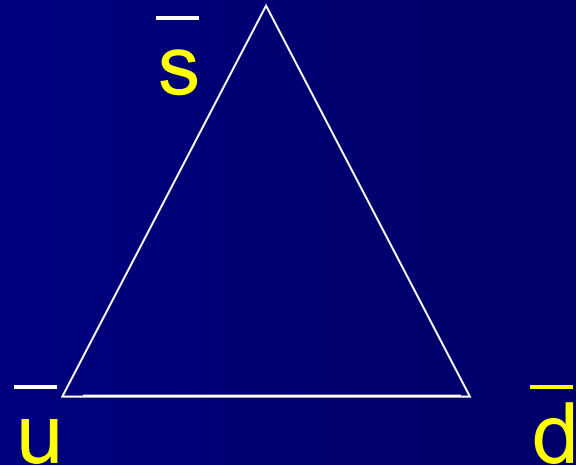
Kwarki –

fundamentalne reprezentacje
grupy SU(3) [zapachu]



$$3 \times 3 \times 3 = 1 + 8 + 8 + 10$$

$$3 \times \bar{3} = 1 + 8$$



Inne (ciężkie) „zapachy”

Do opisu innych zaskakujących zjawisk okazało się potrzebne wprowadzenie innych zapachów (addytywnych liczb kwantowych):

1974 powab (czarm) $C \rightarrow$ kwark c

1977 piękno (beauty, bottom) $B^* \rightarrow$ kwark b

1995 prawda (true, szczytowość, top) $T^* \rightarrow$ kwark t

– Cząstka J/ψ o masie 3 GeV. W zderzeniach e^+e^- odkryto bardzo wąski rezonans. Dlaczego taki wąski (czyli mała szansa rozpadu)? Nie ma na co się rozpaść? Może zawiera nowy typ kwarków? Dziś wiemy $J/\psi = c \bar{c}$; trudny rozpad na 'zwykłe' cząstki (przez 3 gluony) Dla J/ψ $C=0$, ale są cząstki z $C=\pm 1$ np. $D^+ = c \bar{d}$. Masa kwarku $c \sim 1.5$ GeV (masa J/ψ /2).

- <http://capp.iit.edu/hep/bquarkfound.html>
- Podobnie cząstka Υ (9.5 GeV) (→ slajd 9) stan związany $b \bar{b}$ ($B^*=0$) (odkrycie 1977r). Są cząstki z $B^*\neq 0$. Masa kwarku b wynosi ~ 4.5 GeV
 - Masa kwarku $t \sim 172$ GeV (1995r) → t nie tworzy układów związanych.

u,d,s + c,b,t

Obserwujemy multiplety cząstek
zbudowanych z kwarków uds –
masy tych cząstek zbliżone

(różnice poniżej 1 GeV)

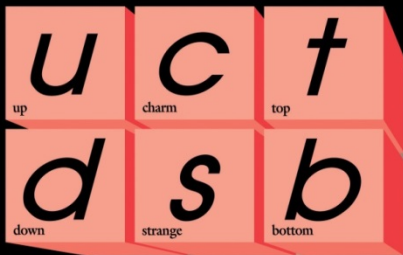
A multiplety udsc ?, udscb ?

obraz się załamuje..

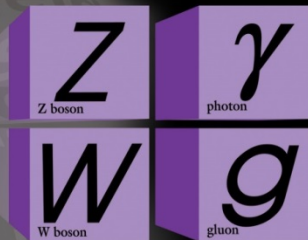
A kwark t wcale nie tworzy stanów
związanych

Nośnikami liczb kwantowych (zapachów) są kwarki

Quarks



Forces



H
Higgs boson



Leptons

Kwarki i leptony są grupowane dwójkami - (duplety)

Dlaczego tak?

To wiąże się z oddziaływaniami słabymi

Np. rozpad beta : $d \rightarrow u$,
neutrino $\rightarrow e$

Prawa zachowania i liczby kwantowe

Zasada zachowania energii

W każdej reakcji (zderzeniu, rozpadzie):

energia końcowa = energia początkowa

- Każda cząstka o masie m ma z nią związaną energię

$$E=mc^2$$

Rozpad możliwy na cząstki o mniejszej masie, więc bardziej masywne cząstki mają więcej szans na rozpad

- Zasada zachowania energii – ściśle przestrzegana przez Naturę

Przykład rozpadu neutronu: bilans masy
($939.6 - [938.3 + 0.511 + 0] = 0.80$) MeV/c^2
→ energia kinetyczna produktów rozpadu

Oczywiście zachowują się też pęd i moment pędu.

Zachowanie ładunku elektrycznego

- Zasada zachowania ładunku el.
 - ściśle przestrzegana w przyrodzie
 - dlatego np. proton nie mógłby się rozpaść na elektron (plus antyneutrino)*
- Ładunek cząstek elementarnych – tylko w określonych porcjach → **skwantowanie ładunku**
(ładunkowa liczba kwantowa)
Niech (w pewnych jednostkach) ładunek el. elektronu = -1,
wtedy ładunek el. protonu +1,
ale kwarku u wynosi $2/3$, zaś d - $1/3$!
- **Obserwowane** cząstki elementarne mają ładunek el. będący wielokrotnością ładunku el. elektronu – czyli $n = 0, 1, 2, \dots$ lub $-1, -2, \dots$
($n = 0$ – cząstka neutralna lub obojętna)

Liczba kwantowa B (barionowa)

- Rozpad protonu nie jest zabroniony przez zasadę zachowania ładunku el.; zasada zachowania energii też pozwala na np.



Więc co zabrania protonowi się rozpaść?

- Nowy pomysł: Stückelberg (1938r)
istnieje nowa liczba kwantowa, która jest zachowana w procesach z nukleonami
- Doświadczalne potwierdzenie tej hipotezy-
testy np. dlaczego neutron nie rozpada się na: e^-e^+ ?
(*baryon, z greckiego ciężki*)

Nowa (addytywna) liczba kwantowa: liczba barionowa

proton=+1, neutron=+1 ($\bar{p}, \bar{n} = -1$); bariony $B \neq 0$

Liczba B zachowana w Naturze

Liczby kwantowe kwarków cd.

- Liczba barionowa B dla p i $n = +1$
Stąd kwarki mają liczbę barionową $= 1/3$
- Ładunek elektryczny dla $p = +1$, $n = 0$, stąd
kwarki $q = 2/3$ lub $-1/3$
antykwariki $\bar{q} = -2/3$ lub $1/3$
np.. $u = 2/3$, $d = -1/3$
- Liczby kwantowe **zapachowe**

Hadrony – stany związane kwarków

Hadrony

Bariony ($B \neq 0$)

3 kwarki

Mezony ($B = 0$)

kwark-antykwar

Hadron- gruby, mocny

np. piony

mezon - pośredni

Kolor – nowa liczba kwantowa

Kolor ma zupełnie inny charakter niż zapach:

zapach (u,d,s...)-klasyfikacja fizycznych cząstek

kolor - dynamika oddziaływań między kwarkami

(→ *chromodynamika kwantowa*)

- wszystkie kwarki są kolorowe
- gluony – też mają kolor ale „podwójny”
kolor i antykolor (np. gluon czerwono- antyniebieski)
- foton „czuje ładunek el.” (→ *elektrodynamika kwantowa*), gluon – ładunek kolorowy (kolor) (oddziałuje z.., sprzęga się do..)
- makroskopowo – ładunek kolorowy nie występuje, kwarki nie występują pojedynczo, są *uwięzione*

Uwięzienie „koloru”?!

Kwarki i gluony są kolorowe, ale są na „zawsze” uwięzione w cząstkach „białych” (niekolorowych) hadronach, które zbudowane są na dwa sposoby:

$$(qqq) \text{ i } (q \bar{q})$$

Uwięzienie to zupełnie nowe zjawisko – czy to koniec drabiny poziomów:

cząsteczka → atom → jądro → nukleon → kwark?

Być może...

Liczba elektronowa L_e

- W wielu procesach elektronowi towarzyszy cząstka neutrino (lub anty-neutrino) np. w rozpadzie neutronu
- **Liczba elektronowa** (addytywna): dla elektronu $e=+1$, dla neutrina elektronowego $\nu_e=+1$
- Dla ich antycząstek = -1, inne cząstki =0
Więc jeśli liczba elektronowa ma być zachowana, to rozpad neutronu musi być taki: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$
- Proces „**skrzyżowany (crossing)**” : $\bar{\nu}_e n \rightarrow p e^-$
też istnieje. Obserwacja procesu $\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$ uważa się za odkrycie (anty)neutrina el. ν_e
Cowan, Reines'1956 (Nobel 1995)
- Przedtem neutrino - tylko hipoteza Pauliego z 1931r (zachowanie energii-pędu w rozpadzie neutronu)

Liczba mionowa, liczba taonowa

Masywniejsze kopie elektronu i neutrina el. ν_e to:

mion (1937r - „*Who ordered that?*” I. Rabi),

taon (odkrycie 1975r, M. Perl, Nobel 1995)

i ich neutrina

ν_μ M. Schwartz, L. Lederman, J. Steinberger 1962r (Nobel 1988)

ν_τ odkrycie – 2000r

LEPTONY: (*lepton* - „lekki”)

elektron, mion, taon i ich neutrina

Analogicznie do L_e wprowadzamy

liczbę mionową L_μ i liczbę taonową L_τ

Liczba leptonowa L

Liczba leptonowa = suma
indywidualnych liczb leptonowych

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau$$

L – zachowana w przyrodzie...

Model Standardowy

Kwarki (wszystkie) :

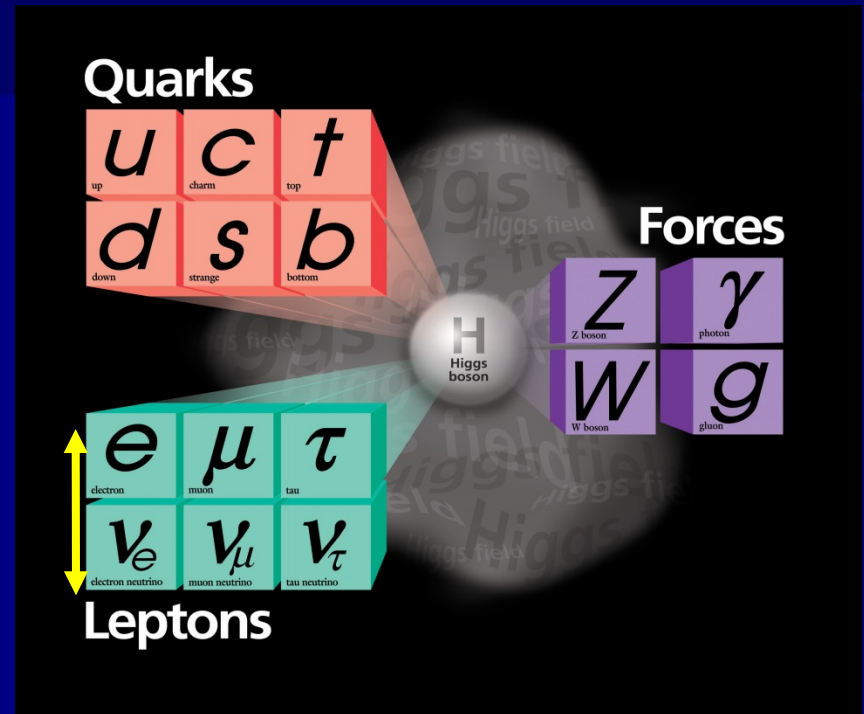
I. barionowa $B = 1/3$

Leptony (wszystkie) :

I. leptonowa $L = 1$

Antykwarki $B = -1/3$

antyleptony $L = -1$



Leptony: indywidualne liczby kw. – elektronowa, muonowa i taonowa

Jakie są dwie najbardziej trwałe cząstki elementarne?

Czy mion rozpada się szybko, czy wolno? **Pytania do wykładu 3**

Co to jest produkcja rezonansowa?

Czy kwark d jest cięższy od kwarku u?

Kiedy odkryto cząstki dziwne?

Co jest dziwnego w cząstkach dziwnych?

Ile wynosi dziwność cząstki J/ψ ?

Kiedy odkryto kwark b?

Ile razy kwark b jest cięższy od protonu?

Co to są hadrony?

Liczba barionowa mezonów wynosi?

Ile wynosi liczba leptonowa antyneutrino mionowego?

Wypisz jedną reakcję skrzyżowaną do rozpadu beta neutronu.