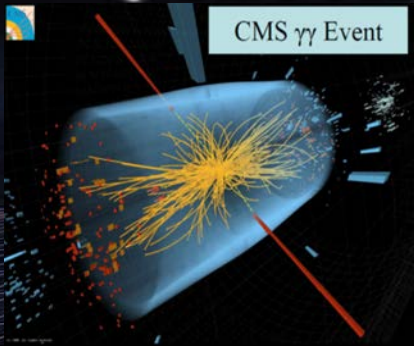


# Wszechświat cząstek elementarnych



## WYKŁAD 3

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

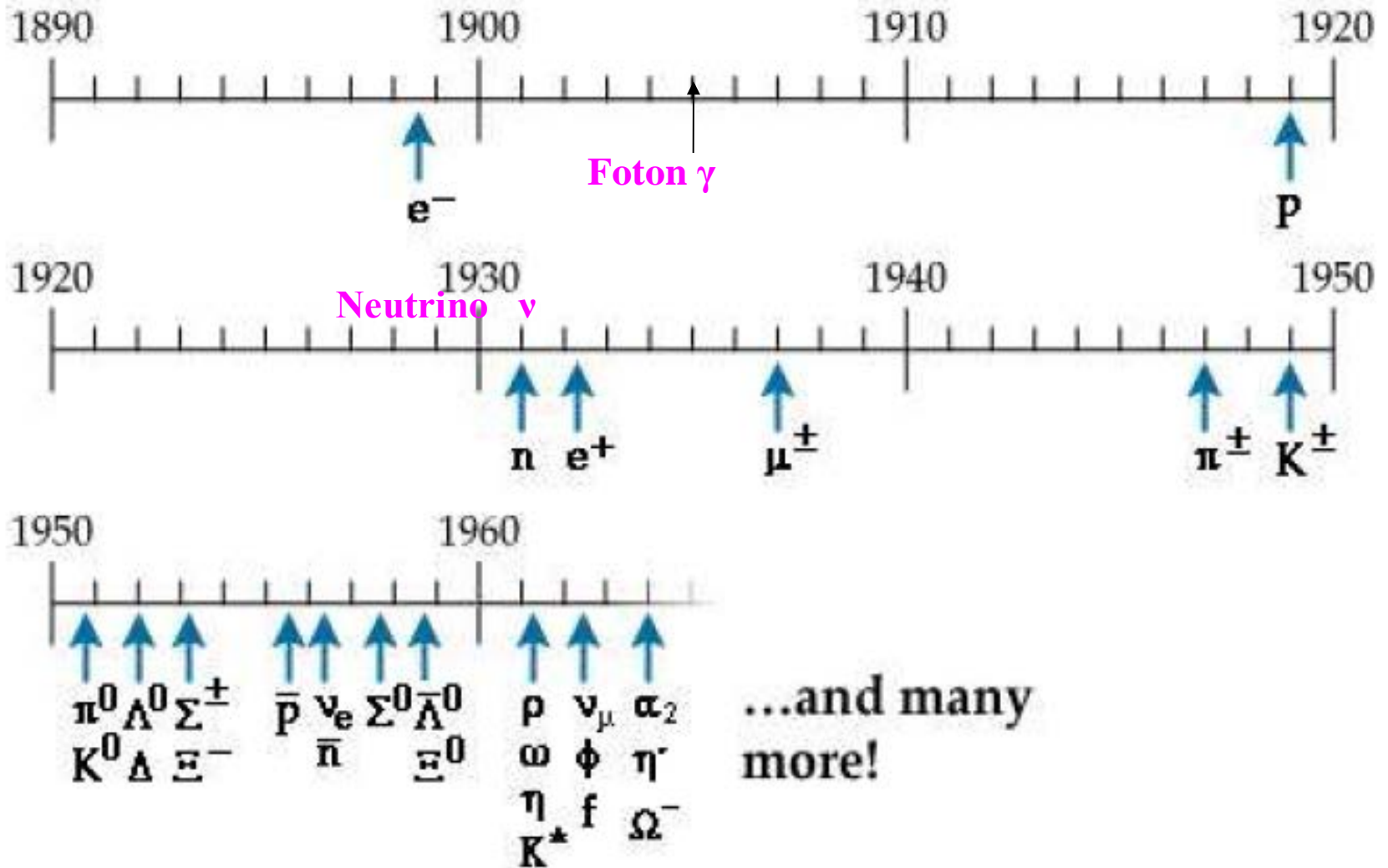
Masy i czasy życia cząstek elementarnych

Kwarki: zapach i kolor

Prawa zachowania i liczby kwantowe:

liczba barionowa i liczby leptonowe

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



# Ogólne własności cząstek elementarnych

# Masy cząstek elementarnych

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

zwykle pomijamy stały czynnik c<sup>2</sup>

Neutrino ~ 0 ?

Elektron ~ 0.5 MeV

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

Proton, neutron (uud, ddu) ~ 1 GeV

Istnieją cząstki masywniejsze niż proton nawet  
ok. 200 razy

Pochodzenie mas cząstek – mechanizm BEH!(2012)

Czy masa cząstki = suma mas składników?

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

# Masa nukleonów

Masa takich cząstek jak proton i neutron wynika z (bardzo silnego) oddziaływania kwarków *u i d*, zgodnie ze wzorem  $m = E/c^2$  (wkład od mas kwarków jest znikomy)

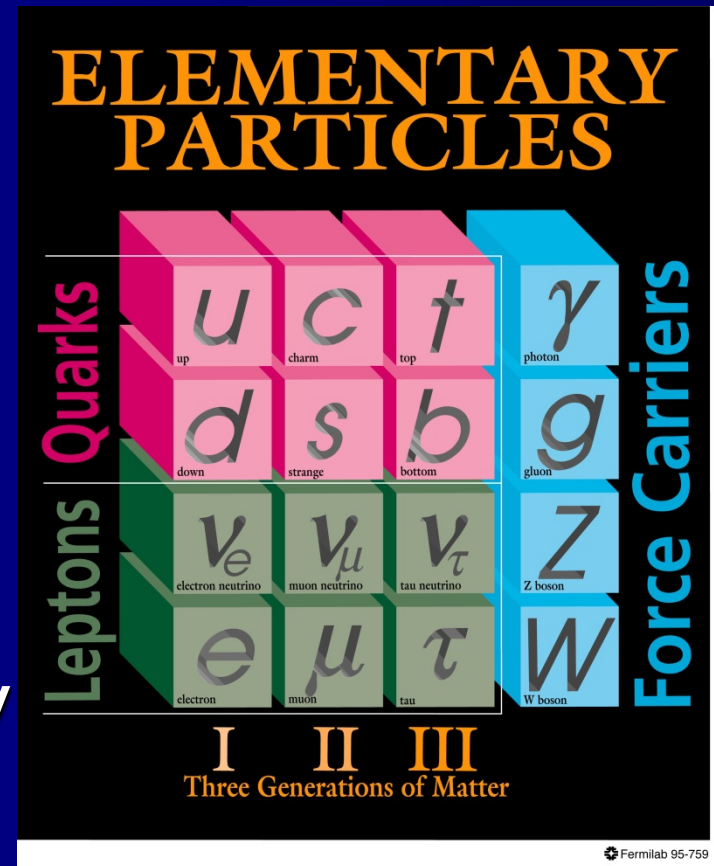
*Cząstka Higgsa nie wiąże się pochodzeniem mas nukleonów (ani zwykłej materii we Wszechświecie) - wbrew doniesieniom różnych ekspertów ...*

*Wiąże się z masami cząstek fundamentalnych*

# 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
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
$<5 \cdot 10^{-6}$ MeV	$<0.27$ MeV	$<31$ MeV
e (elektron)	$\mu$ (mion)	$\tau$ (taon)
0.511 MeV	105.7 MeV	1.78 GeV



# Rozpady cząstek elementarnej

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

Np. **rozpad neutronu czyli rozpad  $\beta$** :

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

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

1914 J. Chadwick: w rozpadzie  $\beta$  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

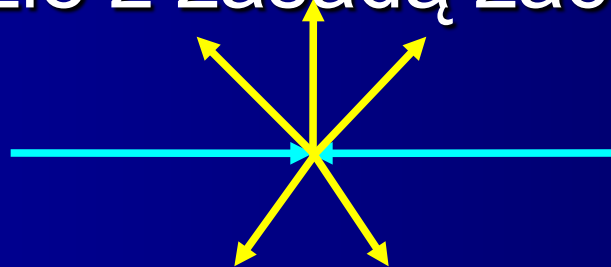
- Czas życia układu to (w przybliżeniu) czas po którym połowa układów danego typu pozostaje  
(dokładniej: *średni czas życia*  $\rightarrow 1/e$  ( $e=2.7$ ) układów zostaje)
- Czasy życia cząstek elementarnych (ozn.  $\tau$ )
  - cząstki trwałe (naj...):  
elektron:  $\tau > 4.6 \cdot 10^{26}$  lat i proton:  $\tau > 10^{30}$  lat
  - cząstki rozpadające się b. 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



# Produkcja cząstek elementarnych

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

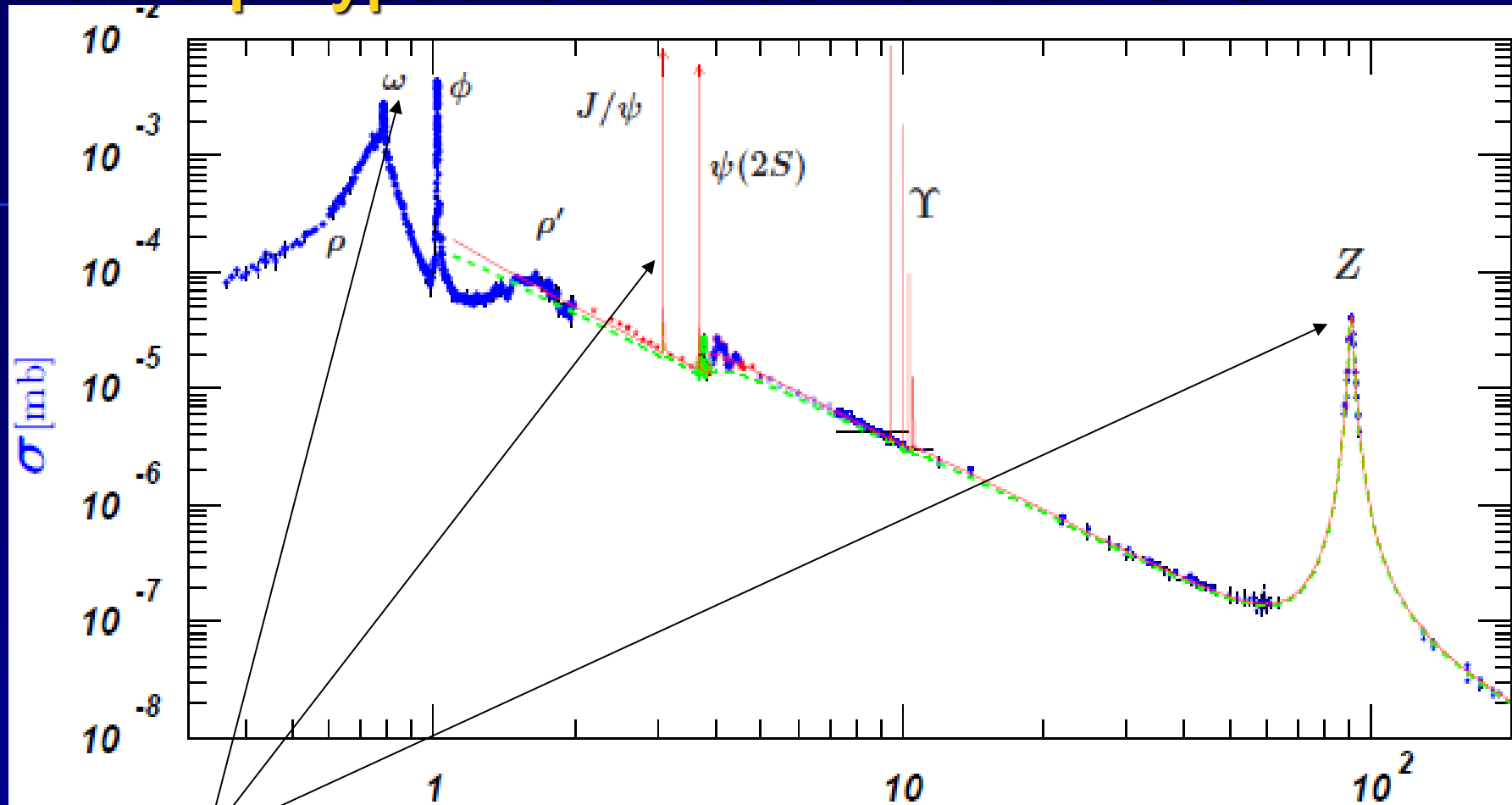
- zawsze w zgodzie z zasadą zachowania energii i pędu



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



# Liczba przypadków w zderzeniach $e^+e^-$



Rezonanse: dla różnych energii zderzenia (GeV)  
energia zderzenia (GeV) = masa cząstki  
szerokość linii rezonansowej  $\Gamma \sim 1/\tau$  (w połowie wysokości)

# Typy (zapachy) kwarków

# Zwykła materia i zwykłe kwarki

Life, <sup>much</sup> of the Universe, <sup>but</sup> 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)

# 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 *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  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

Hipotetyczny rozpad protonu

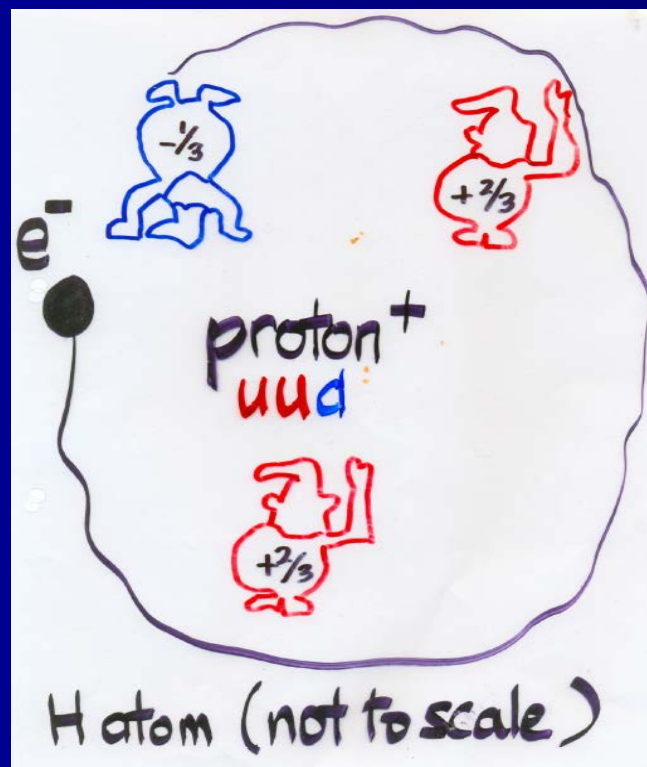
(gdyby kwark u masywniejszy niż d)

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

**Ale dlaczego proton się nie rozpada na inne cząstki?  
Czy to naruszałoby jakąś zasadę? Wróćmy do tego.**

# 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

# Cząstki dziwne

Cząstki dziwne  
odkryto w  
promieniowaniu  
kosmicznym  
~ 1950 r

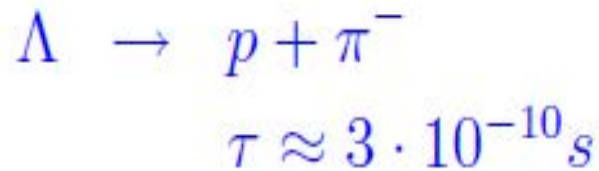
potem w  
laboratoriach



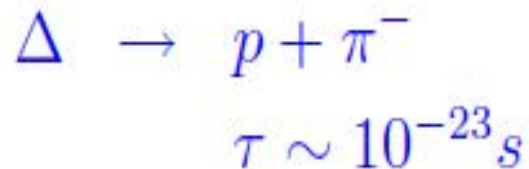


# Cząstki dziwne

Czas życia  
znacznie dłuższy  
od spodziewanego



Porównaj z podobną cząstką



Produkcja i rozpad cząstki  $\Lambda$ :



Aby opisać te procesy wprowadzono nową liczbę kwantową:  
dziwność S

# 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 istnieją procesy w których 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  $s \sim 150 \text{ MeV}$ .

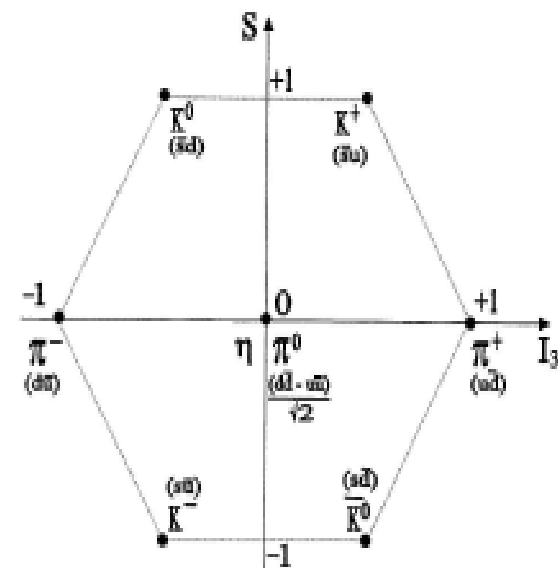
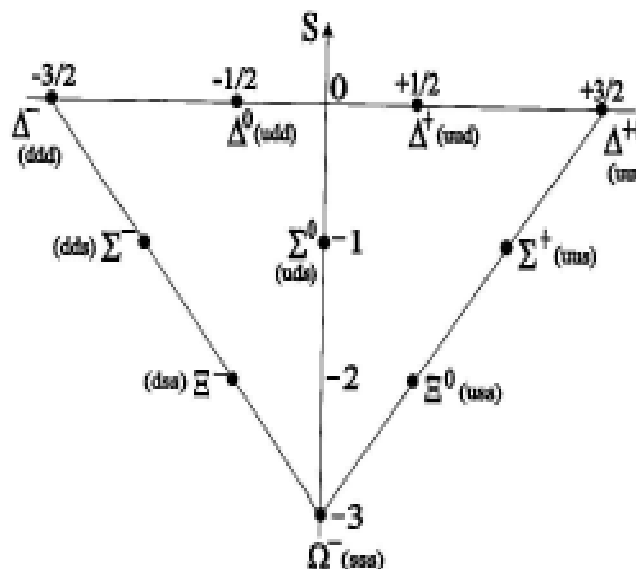
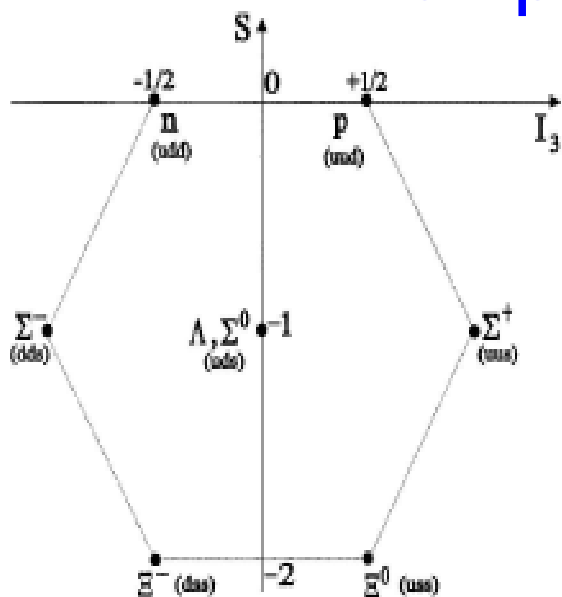
# Model kwarkowy

W połowie lat 60 obserwowana symetria w świecie znanych cząstek doprowadziła Gell-Mann'a i Zweig'a do hipotezy istnienia kwarków

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

Para kwark-antykwarik mezony:

## Multiplety cząstek



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

# Inne (ciężkie) „zapachy”

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

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

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

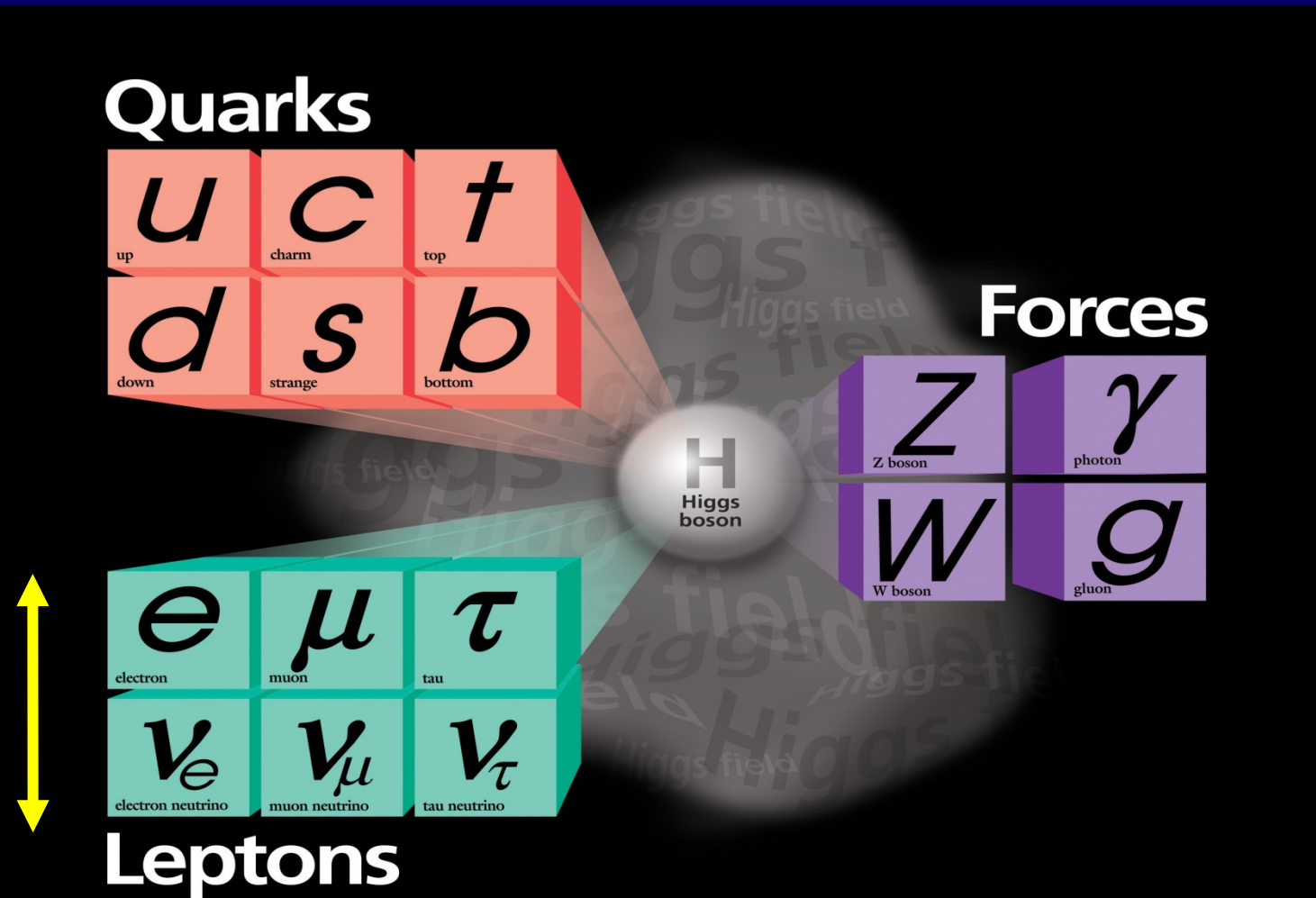
prawda (true, szczytowość, top)  $T^* \rightarrow$  kwark  $t$

– Np. cząstka  $J/\psi$  o masie 3 GeV. W 1974 odkryto bardzo wąski Rezonans ( $\rightarrow$  slajd 9). 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  $J/\psi$   $C=0$ , ale są cząstki z  $C=\pm 1$  np.  $D^+ = c \bar{d}$ .

Masa kwarku  $c \sim 1.3$  GeV.

- $\rightarrow$  <http://capp.iit.edu/hep/bquarkfound.html>
- Podobnie cząstka  $\Upsilon$  (9.5 GeV) ( $\rightarrow$  slajd 9) stan związany  $b \bar{b}$  ( $B^*=0$ ) (odkrycie 1977r). Są cząstki z  $B^*\neq 0$ . Masa kwarku  $b$  wynosi  $\sim 4.5$  GeV
  - Masa kwarku  $t \sim 170$  GeV (1995r)  $\rightarrow$   $t$  nie tworzy układów związanych.

# Nośnikami liczb kwantowych (zapachów) są kwarki



# 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  
( $939.6 - [938.3 + 0.511 + 0] = 0.80$ )  $\text{MeV}/c^2$   
→ 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 - el. neutralne)
- Ładunek cząstek elementarnych – tylko w określonych porcjach → **skwantowanie ładunku**
  - 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 ładunkowa (charge number)

- Zasada zachowania ładunku

(inaczej liczby ładunkowej)

**końcowa l. ład. = początkowa l. ład.**

(liczba ładunkowa układu cząstek = suma liczb ładunkowych cząstek → **addytywna** l. kwantowa)

- Kwantowa liczba ładunkowa

(charge quantum number)

- pierwszy przykład liczby kwantowej

# 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:  $e^-e^+$ ?

**Nowa (addytywna) liczba kwantowa: liczba barionowa**

Proton=+1, neutron=+1 ( p, n = -1);

ogólnie bariony mają  $B \neq 0$  (baryon, z greckiego ciężki)

**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* w hadronach

# Uwięzienie „koloru”?!

Kwarki i gluony są kolorowe, ale są na „zawsze” uwięzione w cząstkach „białych” (niekolorowych) hadronach (qqq) lub (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.  $\nu_e$

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 neutrino el.  $\nu_e$  to:

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

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

i ich neutrino ( $\nu_\mu$  M. Schwartz, L. Lederman i J. Steinberger  
1962r, Nobel 1988;  $\nu_\tau$  odkrycie – 2000r )

**LEPTONY: (*lepton* - „lekki”)**

**elektron, mion, taon i ich neutrino**

Analogicznie do  $L_e$  wprowadzamy

liczbę mionową  $L_\mu$  i liczbę taonową  $L_\tau$



# Liczba leptonowa L

Liczba leptonowa = suma  
indywidualnych liczb leptonowych

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

# Model Standardowy

Kwarki (wszystkie) :

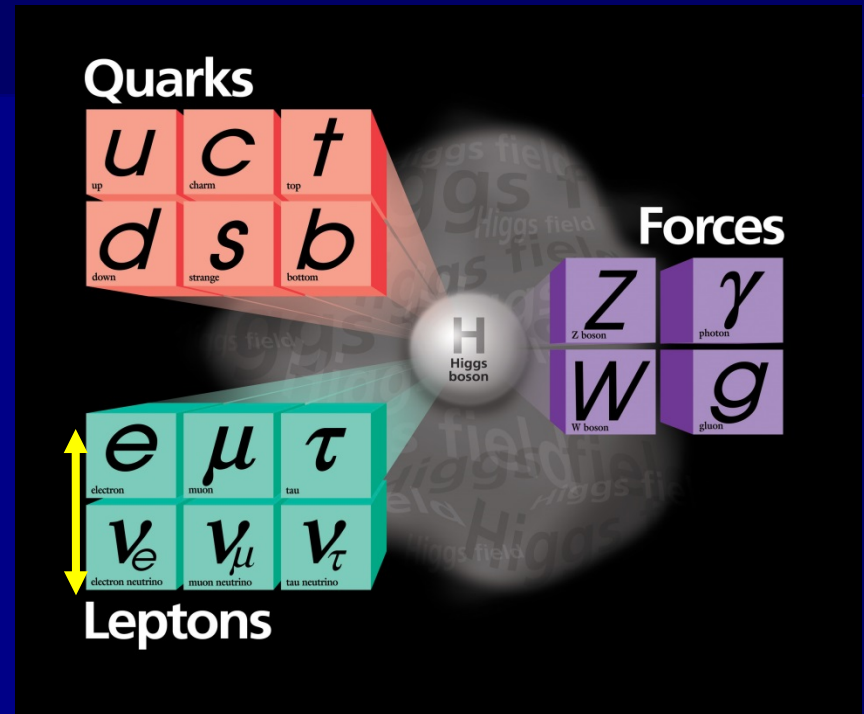
I. barionowa  $B=1/3$

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  $J/\psi$ ?

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.