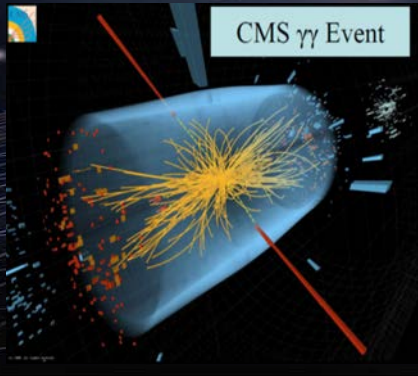


Wszechświat cząstek elementarnych

WYKŁAD 3

M. Krawczyk, Wydział Fizyki UW



6.III.2013

Zoo cząstek elementarnych

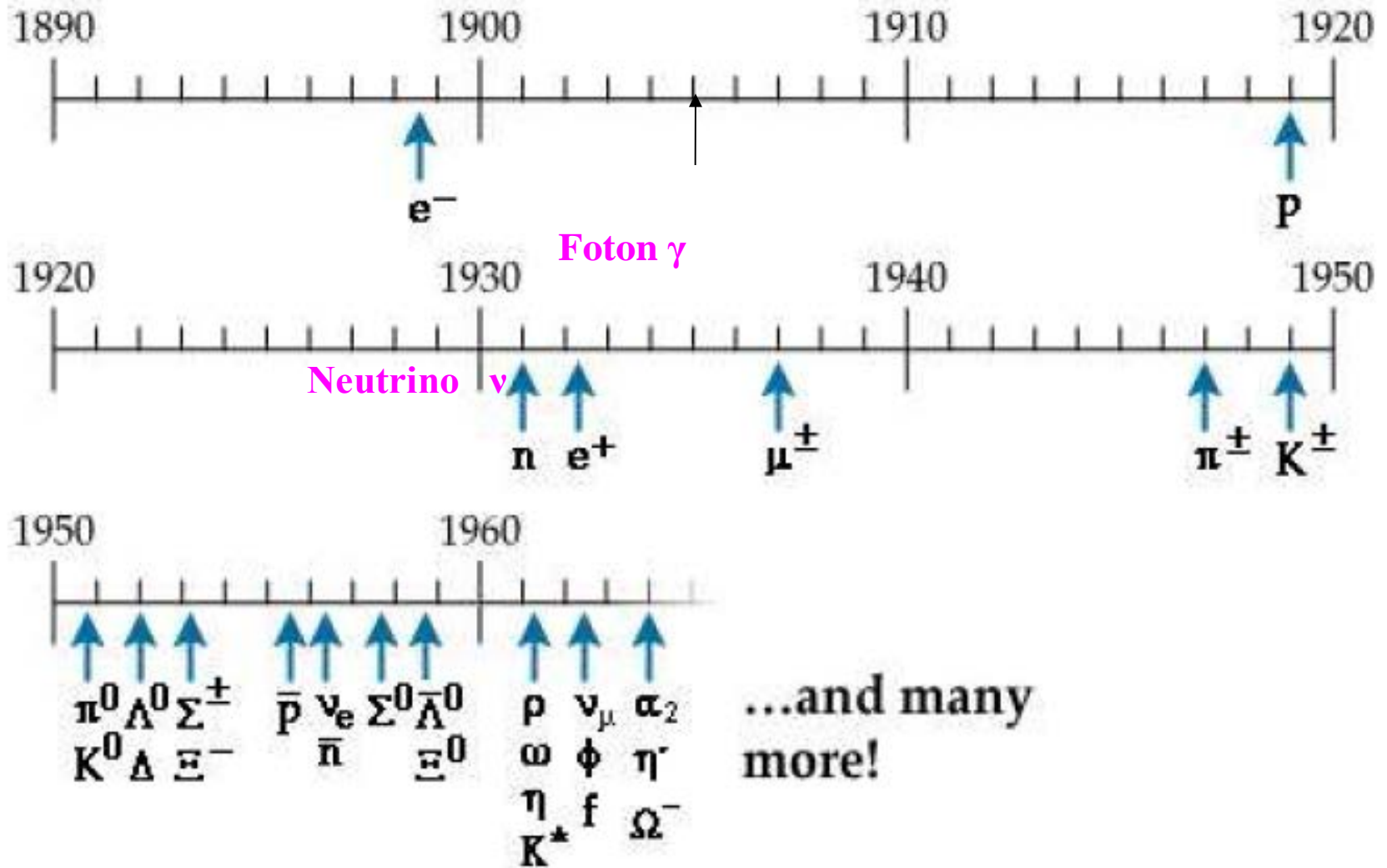
Masy, czasy życia cząstek elementarnych

Liczby kwantowe kwarków (zapach i kolor)

→ Prawa zachowania

→ Liczba barionowa i liczby leptonowe

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



Masy cząstek elementarnych

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

zwykle pomijamy stały czynnik c^2

Neutrino – 0 ?

Elektron – 0.5 MeV

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

Proton, neutron - 1 GeV

Istnieją cząstki masywniejsze niż proton

100 - 200 razy

Pochodzenie mas cząstek – nadal zagadką.

Czy masa cząstki = suma mas składników?

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

Czasy życia cząstek elementarnych

- Czas życia układu ~ czas po którym połowa układów danego typu przestaje istnieć
- Czasy życia cząstek elementarnych (ozn. τ)
 - cząstki trwałe:
dla elektronu $> 4.6 \cdot 10^{26}$ lat i protonu $> 10^{30}$ 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**

Ale co to oznacza rozpad cząstki elementarnej?

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 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)

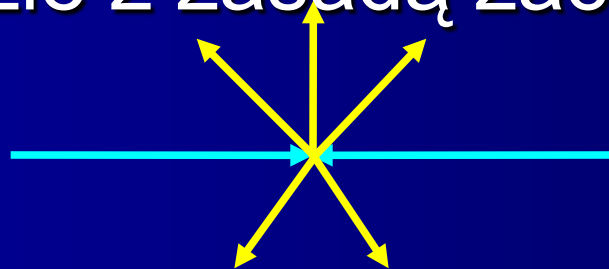
N. Bohr – może energia się nie zachowuje?

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

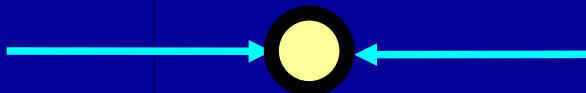
E. Fermi 1932 - nazwa **neutrino** (*włoski: neutralne maleństwo*)

Produkcja cząstek elementarnych

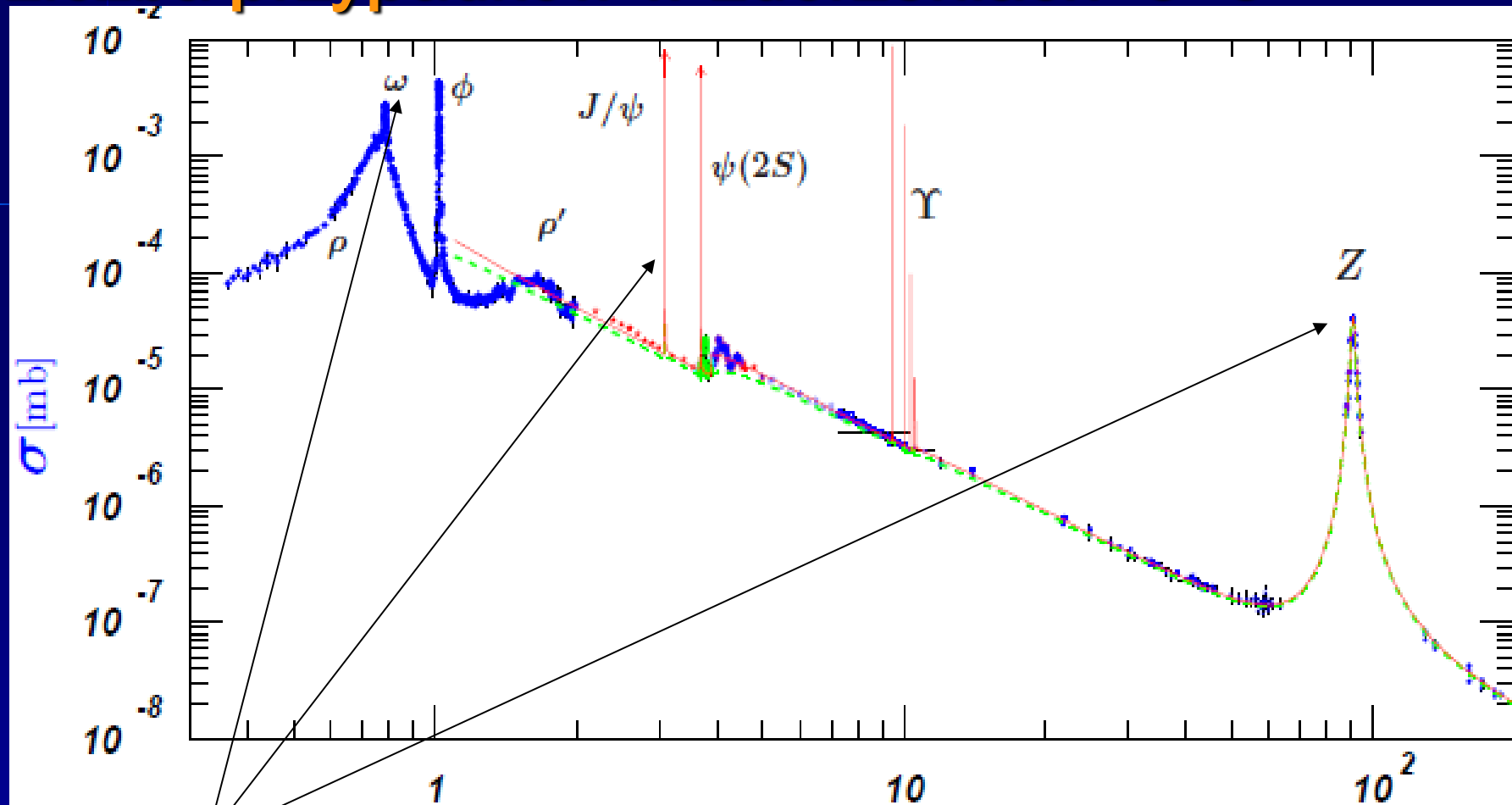
W zderzeniach cząstek danego typu może nastąpić produkcja dwóch, trzech,..N cząstek
- zawsze w zgodzie z zasadą zachowania energii i pędu



Energia zderzenia może się zamienić całkowicie na energię spoczynkową jednej nowej cząstki, zgodnie z $E=mc^2$ - produkcja rezonansowa - tak odkryto wiele cząstek



Liczba przypadków w zderzeniach e^+e^-



Rezonanse:

dla różnych energii zderzenia (GeV)

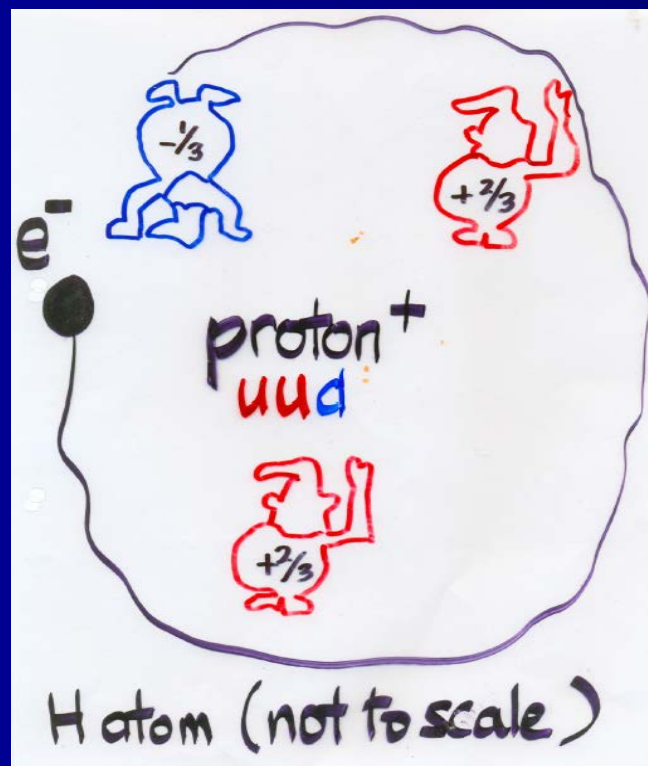
energia zderzenia (GeV) = masa cząstki

szerokość linii rezonansowej $\Gamma \sim 1/\tau$

Typy (zapachy) kwarków

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

IZOSPIN: symetria p-n

Siły jądrowe nie zależą od tego czy oddziałują protony ze sobą (pp), neutrony ze sobą (nn), czy neutrony z protonami (np).

Czyli jeśli zamienimy p na n lub odwrotnie, „siła” oddziaływania jądrowego taka sama → **symetria**

Nazwa: **symetria izotopowa** (Wigner)

(powinna być izobaryczna...)

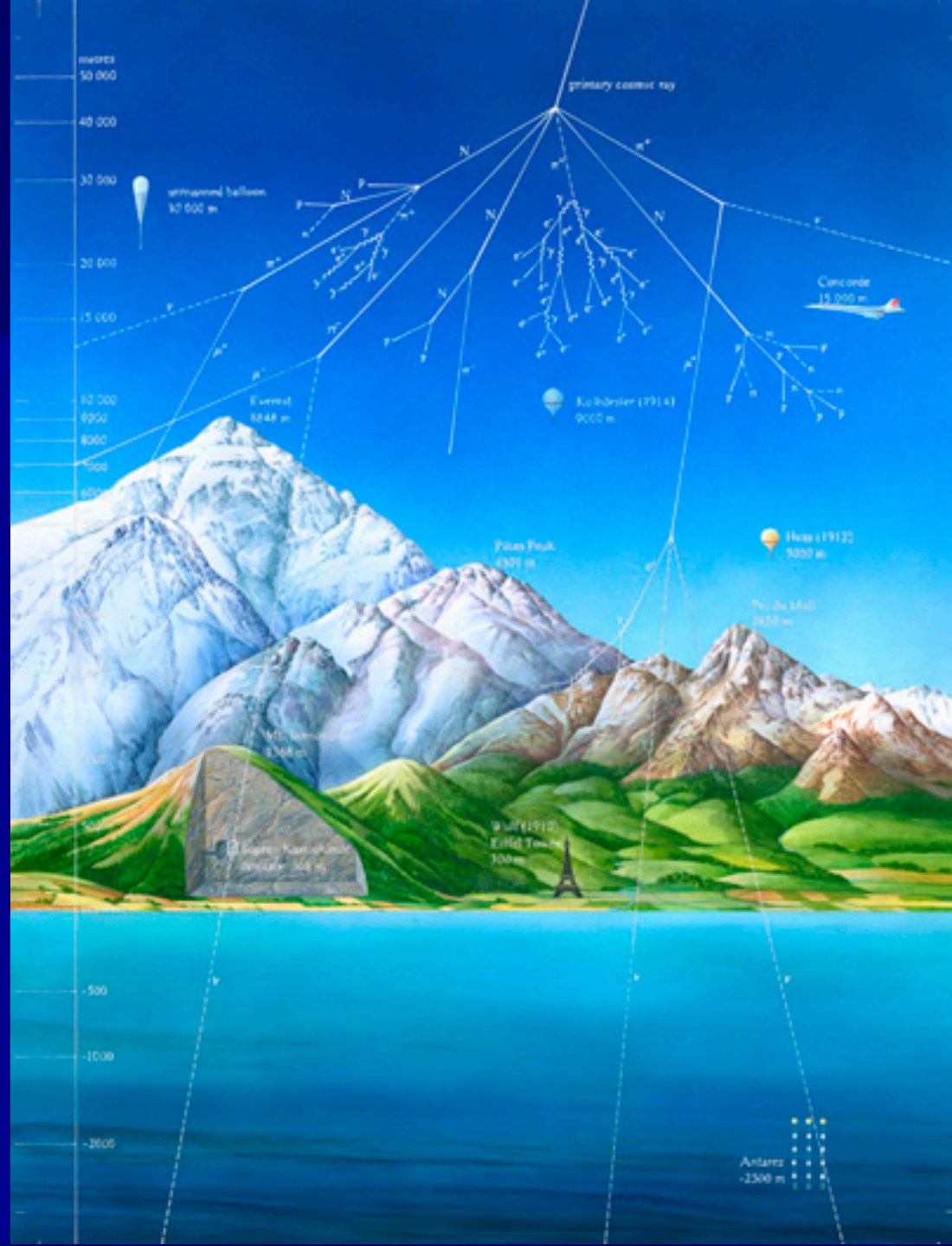
Są dwa stany → określenie spin izotopowy = izospin

Na poziomie kwarkowym symetria : zmiana kwarku u na kwark d (lub odwrotnie)

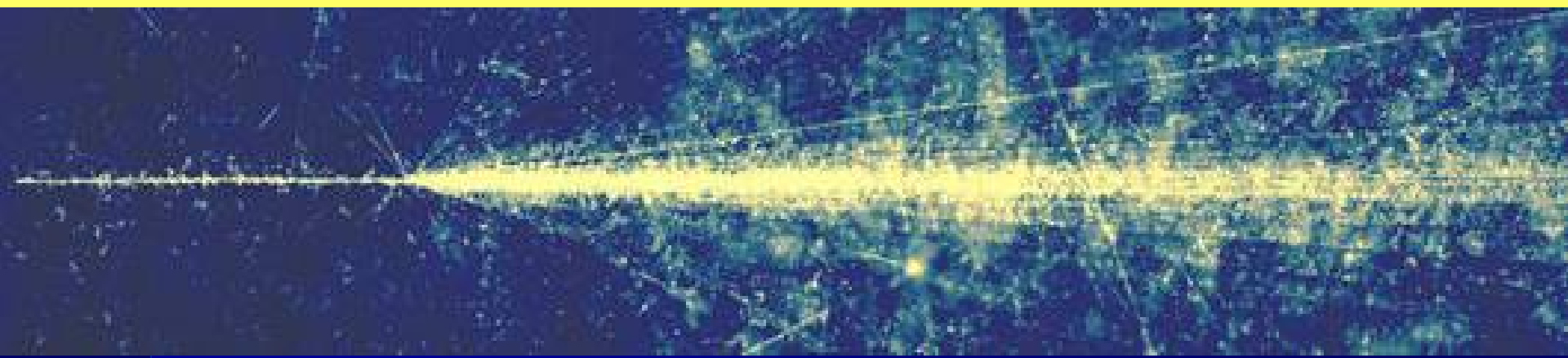
Cząstki dziwne

Cząstki dziwne
odkryto w
promieniowaniu
kosmicznym
~ 1950 r

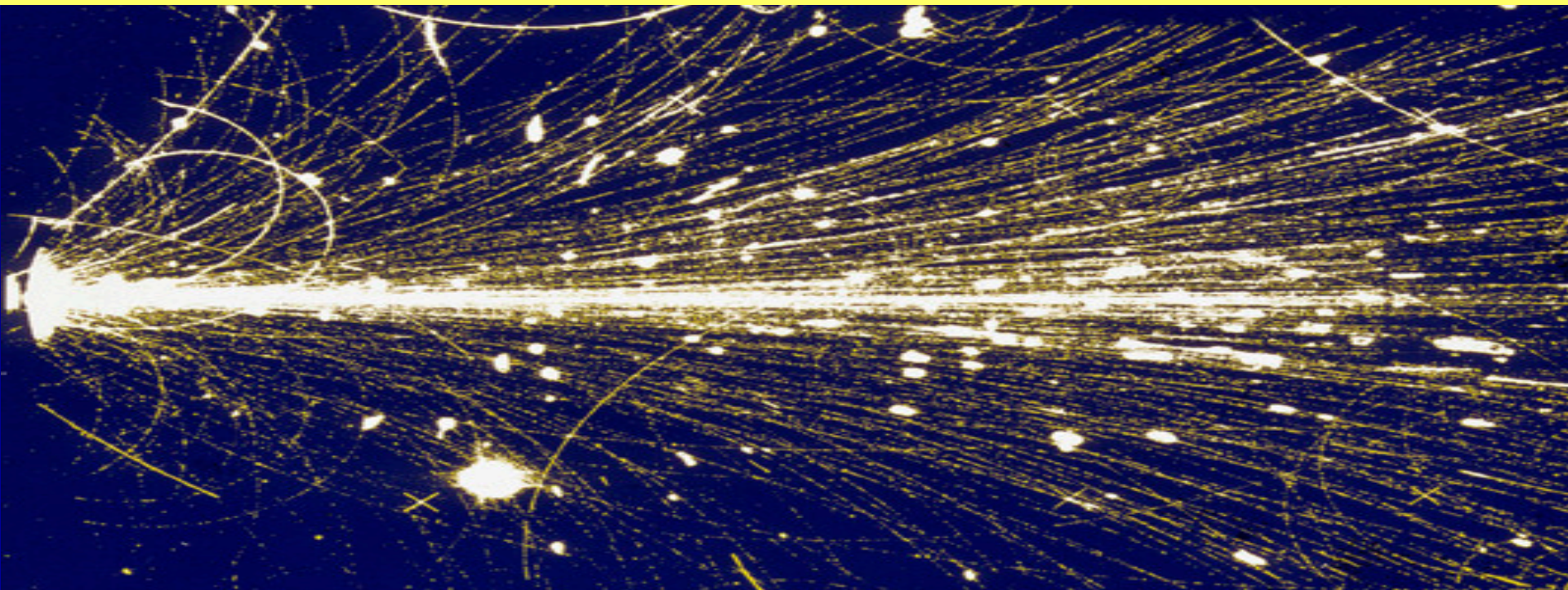
potem w
laboratoriach



1955 CERN accelerators replicate cosmic rays on Earth...



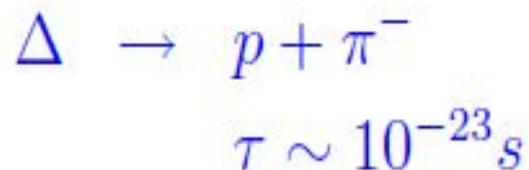
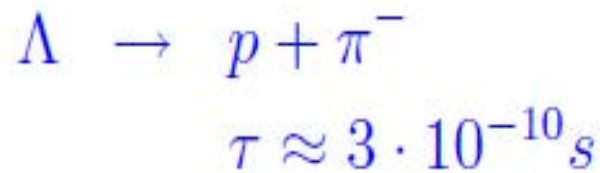
..record the images and reveal the real heart of matter....



the beginnings of modern high energy particle physics [Close]

Cząstki dziwne

Czas życia
znacznie dłuższy
od spodziewanego



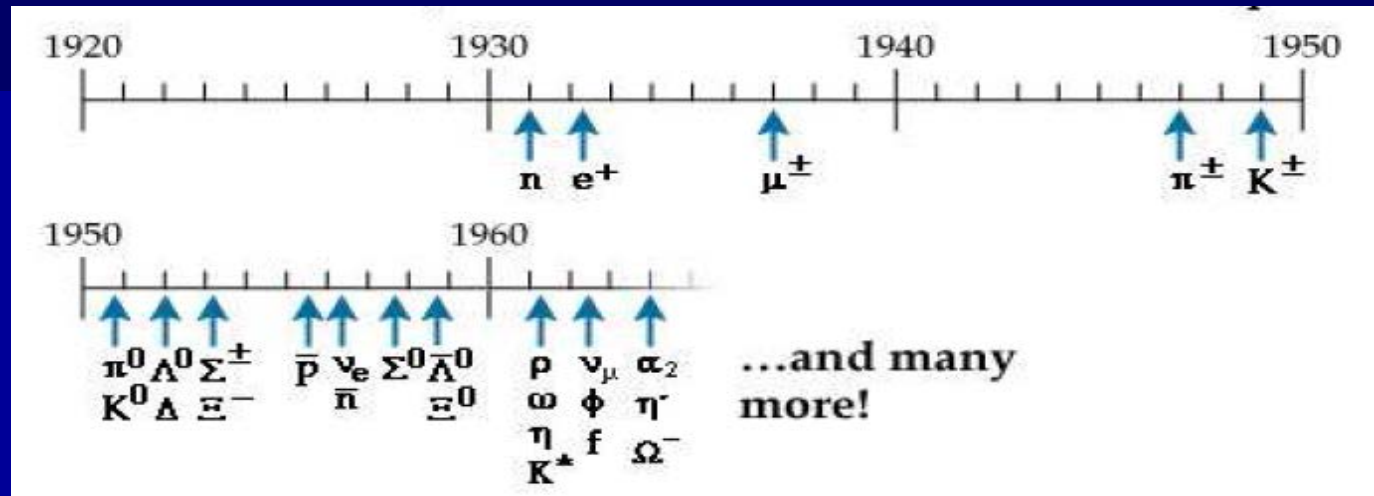
Produkcja i rozpad cząstki Λ :



Dziwne też to, że produkują się
tylko parami!

Aby opisać wprowadzono nową liczbę kwantową dziwność S

Model kwarkowy



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

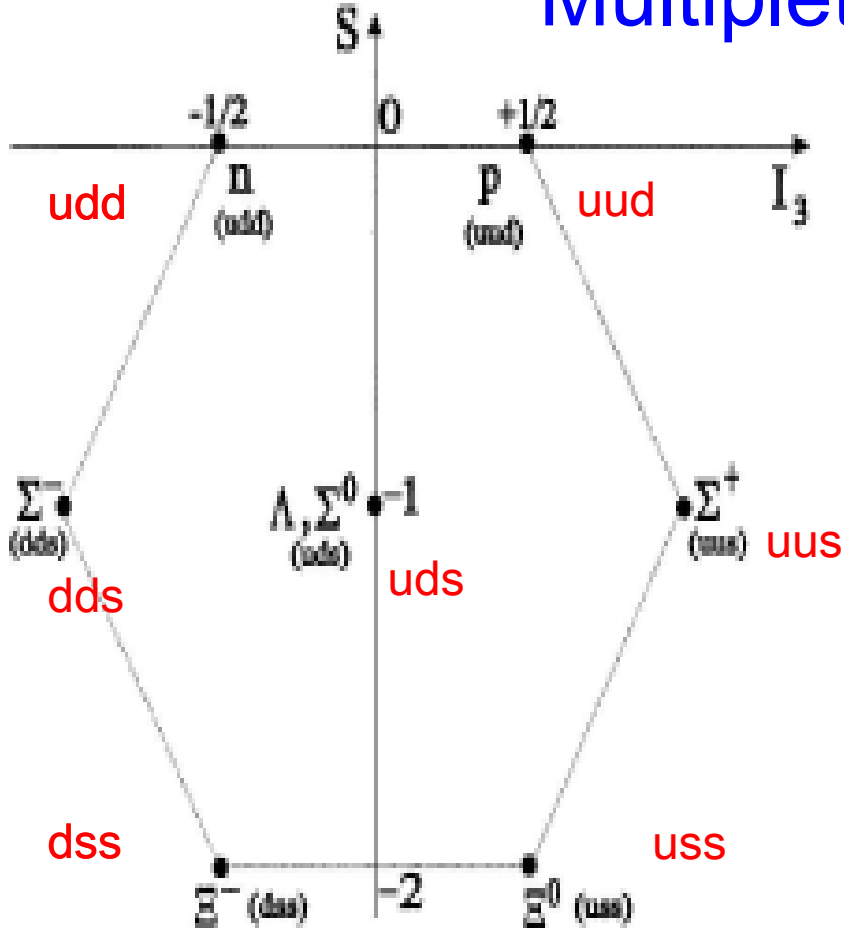
(→ *następny slajd*)

Gell-Mann i Zweig:

jakaś nowa symetria?...

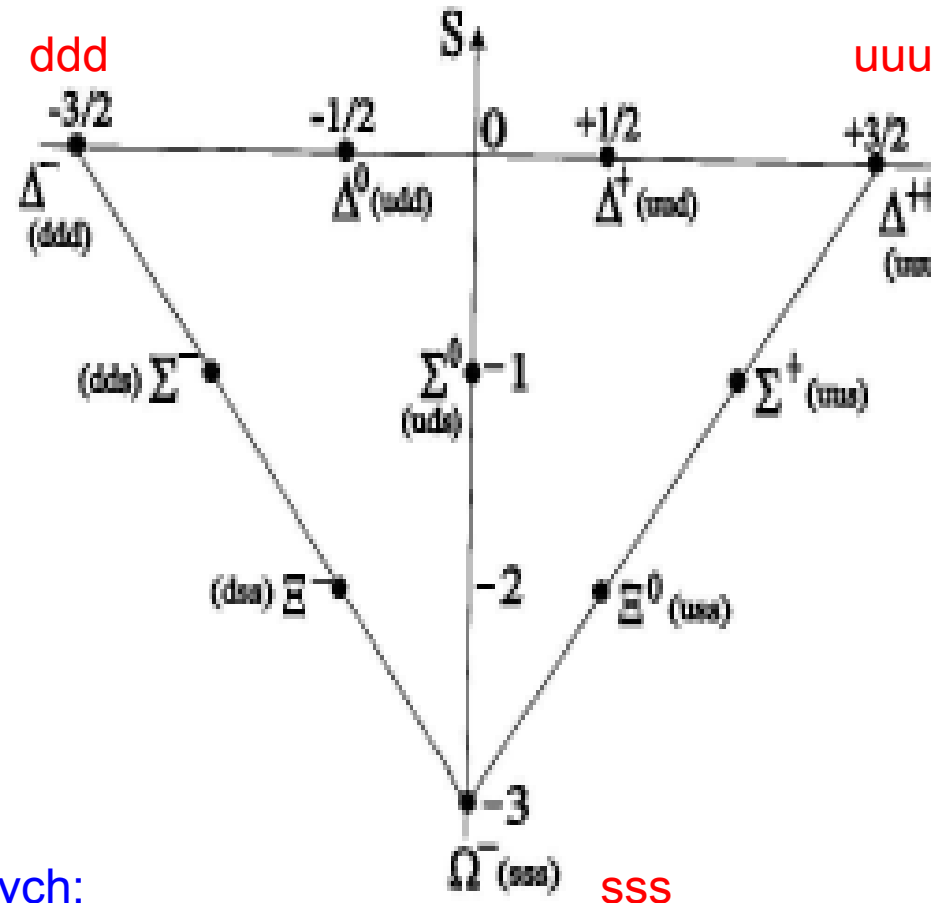
hipoteza kwarków

Multiplety cząstek



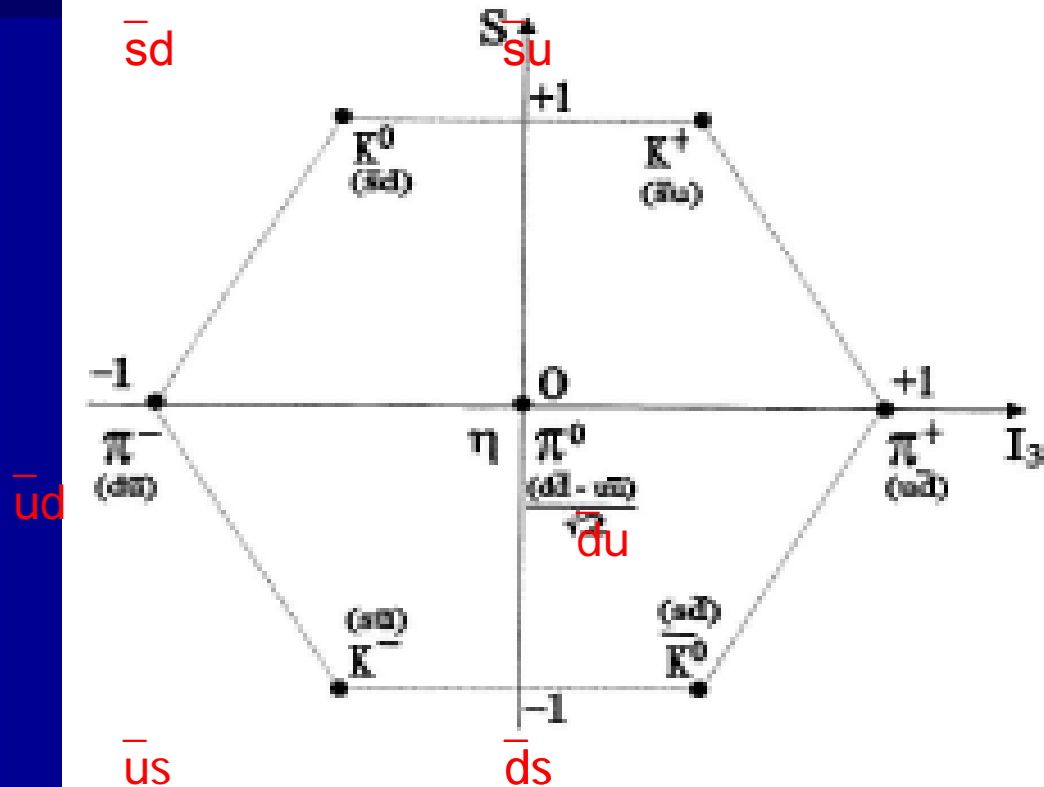
na osiach wartości dwóch liczb kwantowych:
 izospinu I (związanego z kwarkami u i d) oraz dziwności S

Masy ok 1 GeV



Masy ok 1.7 GeV

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

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 $s \sim 150 \text{ MeV}$.

Inne (ciężkie) „zapachy” kwarków

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

powab (czarm) C – kwark c

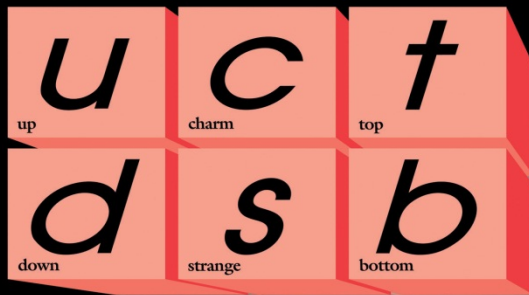
piękno (beauty, bottom) B^* – kwark b

prawda (true, szczytowość, top) T^* – kwark t

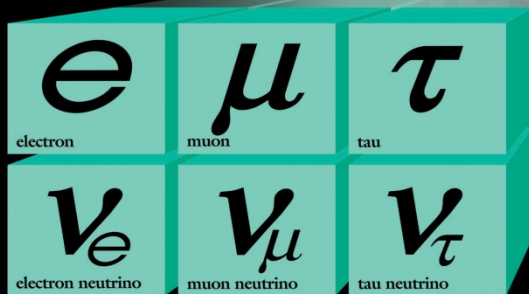
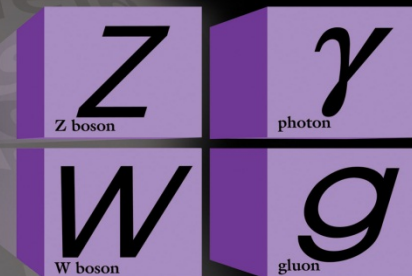
- C Np. cząstka J/ψ o masie 3 GeV. W 1974 odkryto b. wąski rezonans. Dlaczego taki wąski (mała szansa rozpadu)? Nie ma na co się rozpaść! Może zawiera nowy typ kwarków? Dziś wiemy $J/\psi = c \bar{c}$; rozpad na 'zwykłe' cząstki trudny-przez 3 gluony. Dla J/ψ $C = 0$, ale są cząstki z $C = \pm 1$ np. $D^+ = c \bar{d}$. Masa kwarku c – 1.3 GeV.
- B^* Podobnie cząstka Υ (9.5 GeV) stan związany $b \bar{b}$ ($B^* = 0$). (odkrycie 1977r). Masa kwarku b ok. 4.5 GeV. Są cząstki z $B^* \neq 0$.
- T^* Masa kwarku t ok. 170 GeV (1994) → nie tworzy układów związanych

Nośnikami liczb kwantowych zapachowych są kwarki

Quarks



Forces



Leptons

Różnica mas kwarku u i d

- Te kwarki tworzą proton (uud) i neutron (ddu)
Masy p i n: $m_p=938.3$ MeV , $m_n=939.5$ MeV, $\Delta m=1.3$ MeV
→ różnica mas d i u
Masa kwarków u i d – kilka MeV (→ inna nazwa *lekkie kwarki*)
- Rozpad neutronu = rozpad kwarku d na kwark u
(+ elektron + antyneutrino elektronowe)

Kwark d – ma większą masę i rozpada się na cząstkę o mniejszej masie
- Ale co by było gdyby odwrotnie $m_d < m_u$?

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)

$$p \rightarrow n e \bar{\nu}_e$$

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

Prawa zachowania i liczby kwantowe

Zasada zachowania energii

W każdej reakcji (zderzeniu, rozpadzie):

energia końcowa = energia początkowa

- Każda cząstka o masie m ma związaną z nią energię

$$E=mc^2$$

Więc rozpad możliwy na cząstki o mniejsze masie;
bardziej masywne cząstki mają więcej szans na rozpad

- Zasada zachowania energii – ściśle przestrzegana przez Naturę

Przykład rozpadu neutronu: bilans masy
($939.5 - [938.3 + 0.511 + 0] = 0.80$) MeV/c²
→ energia kinetyczna produktów rozpadu

Oczywiście zachowują się też pęd (→zachowanie energii-pędu) 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.)
- Ładunek cząstek elementarnych – tylko w określonych porcjach → **skwantowanie ładunku**
 - Niech 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
czyli zachowanie liczby ładunkowej
końcowa l. ład. = początkowa l. ład.
(→ suma l. ładunkowych cząstek)
- 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 rozpad
np. $p \rightarrow e^+ \text{ neutrino el.}$
Więc co zabrania protonowi się rozpaść?
- Nowy pomysł: Stückelberg (1938)
istnieje nowa liczba kwantowa
(zachowana w procesach z nukleonami)
- Doświadczalne potwierdzenie tej hipotezy-
np. testy dlaczego neutron nie rozpada się na: $e^- e^+$?

Nowa (addytywna) liczba kwantowa: liczba barionowa

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

Liczba B zachowana w Naturze

(baryon, z greckiego *ciężki*)

Liczby kwantowe kwarków cd

- Liczba barionowa B dla p i $n = +1$
Stąd kwarki mają liczbę barionową $= 1/3$
- Ładunek elektryczny
kwarków $q = 2/3$ lub $-1/3$
antykwarłów $\bar{q} = -2/3$ lub $1/3$
 $u = 2/3, d = -1/3 \rightarrow$ ład. el. $p = +1, n = 0$
- Liczby kwantowe **zapachowe** (np. S, C, B^*)

Hadrony – stany związane kwarków

Hadrony

Bariony ($B \neq 0$)

3 kwarki

Mezony ($B = 0$)

kwark-antykwar

Hadron- gruby, mocny

mezon - pośredni

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 l. 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 ν_e (Cowan, Reines'1956, Nobel 1995)
- Przedtem neutrino - tylko hipoteza Pauliego z 1930r
(zachowanie energii-pędu w rozpadzie neutronu)

Liczba mionowa, liczba taonowa

Masywniejsze kopie elektronu i ν_e to:

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

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

i ich neutrina (ν_μ M. Schwartz, L. Lederman i 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

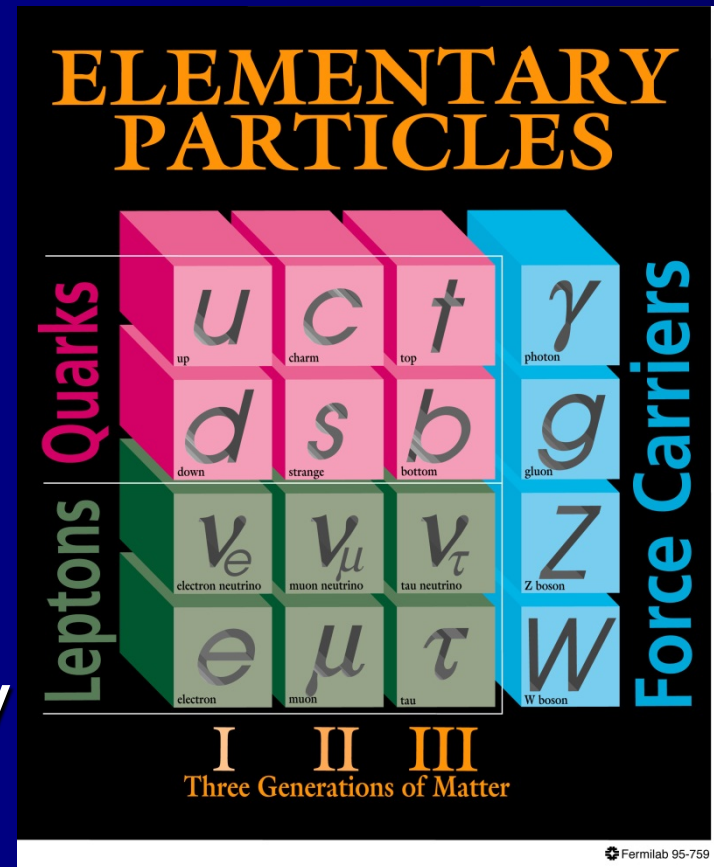
$$L = L_e + L_\mu + L_\tau$$

L – zachowana w przyrodzie

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 (elektron) | μ (mion) | τ (taon) |
| 0.511 MeV | 105.7 MeV | 1.78 GeV |



Model Standardowy

Kwarki (wszystkie) :

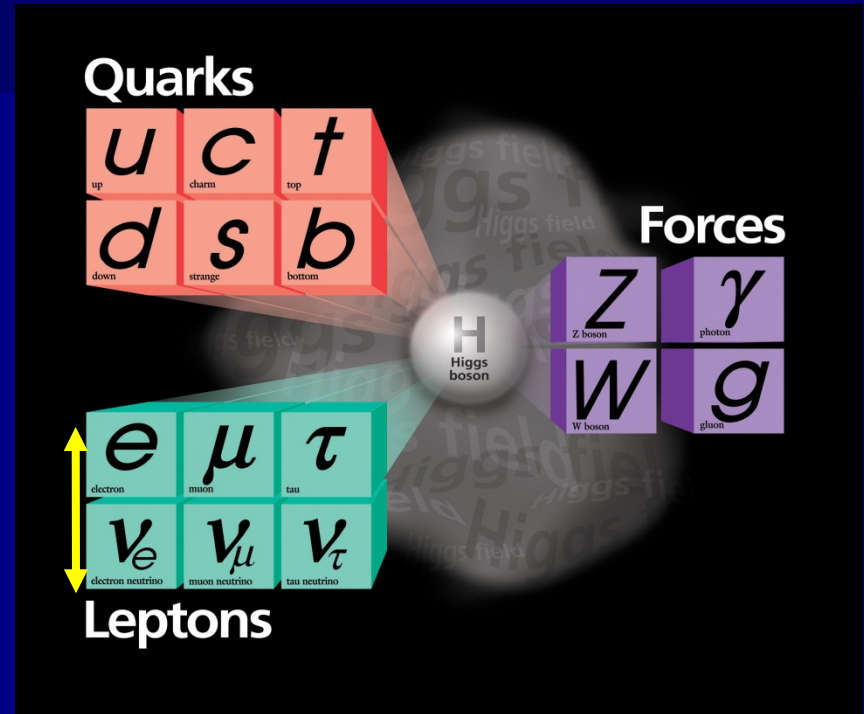
I. barionowa $B=1/3$

Leptony (wszystkie) :

I. leptonowa $L = 1$

Antykwarki $B= -1/3$

antyleptony $L= - 1$



Leptony: indywidualne liczby kw.– elektronowa, muonowa i taonowa (zapachy leptonów)

Kolor – nowa liczba kwantowa

Kolor ma zupełnie inny charakter niż zapach:

zapach (u,d,s...) \leftrightarrow klasyfikacja cząstek

kolor \leftrightarrow dynamika oddziaływań między kwarkami

- wszystkie kwarki są kolorowe

- gluony – też mają kolor ale „podwójny”

kolor i antykolor (np. gluon czerwono- antyniebieski)

foton „czuje ładunek el.” (\rightarrow *elektrodynamika kwantowa*), gluon „czuły” na ładunek kolorowy (oddziałuje z.., sprzęga się do..

\rightarrow *chromodynamika kwantowa*)

- makroskopowo – ładunek kolorowy nie występuje, bo kwarki nie występują pojedynczo

Pytania do wykładu 3

Jakie są dwie najbardziej trwałe cząstki elementarne?

Czy mion rozpada się szybko, czy wolno?

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.

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)



proton



neutron

what is the neutrino needed for ??