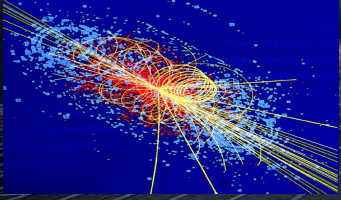


# Wszechświat cząstek elementarnych



## WYKŁAD 3

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

3.III.2011

Zoo cząstek elementarnych

Pierwsze cząstki: elektron i foton

Masy, czasy życia cząstek elementarnych

Liczby kwantowe kwarków (zapach i kolor)

→ Prawa zachowania

→ Liczba barionowa i liczby leptonowe

# W świecie cząstek elementarnych obowiązują

1. teoria względności i prawa mechaniki kwantowej
2. niektóre znane z makroświata prawa zachowania  
np. energii i pędu oraz ładunku elektrycznego  
oraz nowe prawa

## Fizyka cząstek elem.= fizyka wysokich energii

W badaniu struktury materii stosowane są **coraz większe energie**, gdyż:

- Zasada nieoznaczoności Heisenberga → większa energia umożliwia dotarcie do coraz mniejszych struktur  
(większa zdolność rozdzielcza  $\Delta x \sim 1/E$ )
- Relacja  $E = mc^2$  → większa energia umożliwia produkcję nowych bardziej masywnych cząstek

Uwaga: stosujemy elektrowolt eV jako jednostkę energii  $E$  i masy  $m$ , gdyż  $E$  i  $m$  różnią się jedynie stałą  $=kw.$  prędkości światła  $c$  (formalnie oznacza to  $c = 1$ )

# Zoo cząstek elementarnych

Definicja: cząstka elementarna to

obiekt prostszy niż jądro atomowe

(wyjątek stanowi najprostsze jądro H (wodór), czyli proton, który jest cząstką elementarną.)

Cząstki elementarne – AD 2011 (<http://pdg.lbl.gov/>)

dużo (1000) i różnorodne (Zoo):

różne masy,

różne czasy życia (mogą się rozpadać !),

różne ładunki elektryczne,

różne sposoby oddziaływań,

grupowanie się w różne układy (multiplety)

Cząstki elementarne mogą być złożone (proton) !

najprostsze składniki → cząstki fundamentalne

# Cząstki elementarne i fundamentalne

- Cząstki takie jak proton  $p$  i neutron  $n$  to stany związane kwarków.

Cząstki fundamentalne (np. kwarki, elektron) – cząstki bez wewnętrznej struktury

- Fizyka cząstek elementarnych zajmuje się obecnie poziomem fundamentalnym – cząstkami fundamentalnymi i ich oddziaływaniami

opis teoretyczny: **Model Standardowy**

- Cząstki przenoszące oddziaływania fundamentalne – to też cząstki fundamentalne

# Antycząstki (antymateria)

- Antycząstki to też cząstki, choć mogą się różnić od swoich „partnerów” pewnymi własnościami, np. ładunkiem el.  
Cząstki i antycząstki mają tę samą masę i czas życia.
- Elektron i pozyton – to para cząstka-antycząstka (ale która jest którą to sprawa umowy); różnią się znakiem ładunku elektrycznego (pozyton ma ładunek dodatni).  
Elektron odkryto w 1897, a pozyton dopiero w 1932
- Istnienie antycząstek wynika z prawa przyrody.  
Przewidywanie teoretyczne istnienia antycząstki –  
P. Dirac’ 1928 (*mylnie uważał proton za antycząstkę do elektronu, choć kłopot z masami..*)
- Cząstka i antycząstka mogą oddziaływać b. gwałtownie – zniknąć (anihilacja) i pojawiać się w parach (kreacja)
- Cząstka może być swoją antycząstką
- My i wszystko dokoła nas to materia!

Oznaczenie: kreska nad symbolem cząstki np. kwark  $u$  i antykwark  $\bar{u}$

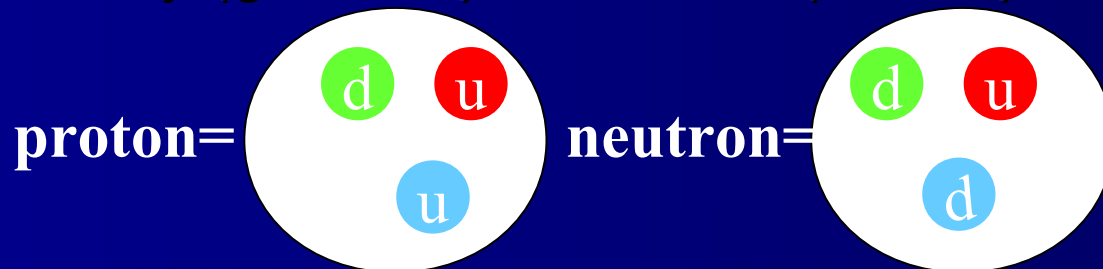
# Nukleony i zwykłe kwarki (oraz klej czyli gluony)

Proton  $p$  i neutron  $n$  zbudowane są z 3 kwarków

Są to kwarki:  $u$  (*up*) i  $d$  (*down*) → *zwykłe kwarki*

Wszystkie kwarki występują w 3 stanach (*barwach, kolorach*)  
- nowa liczba kwantowa

*Czerwony (red R), zielony (green G) i niebieski (blue B)*  
(ale to tylko nazwy)



Kwarki są fundamentalne..

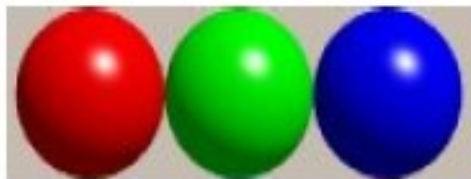
Ale nie występują jako cząstki swobodne – **są uwiezione!**

W nukleonach są **gluony (kolorowe) sklejące całość**

(w atomie tę rolę pełnią fotony, nośniki sił elektromagnetycznych (e-m) )

# Kolor

Każdy z kwarków obdarzony jest ładunkiem kolorowym:  $R$ ,  $G$  lub  $B$ .

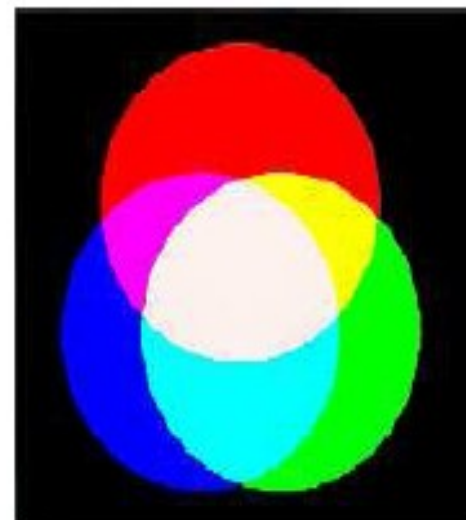


Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”):  $\bar{R}$ ,  $\bar{G}$ ,  $\bar{B}$ .



Jako swobodne mogą istnieć tylko cząstki nie niosące netto ładunku kolorowego (cząstki “białe”):

$$\begin{aligned} R + G + B &= 0 \\ R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} &= 0 \end{aligned}$$



# Uwięzienie „koloru”?!

Kwarki i gluony są kolorowe, ale na stałe uwięzione w cząstkach „białych” (niekolorowych) typu  $(qqq)$  lub  $(q \bar{q})$

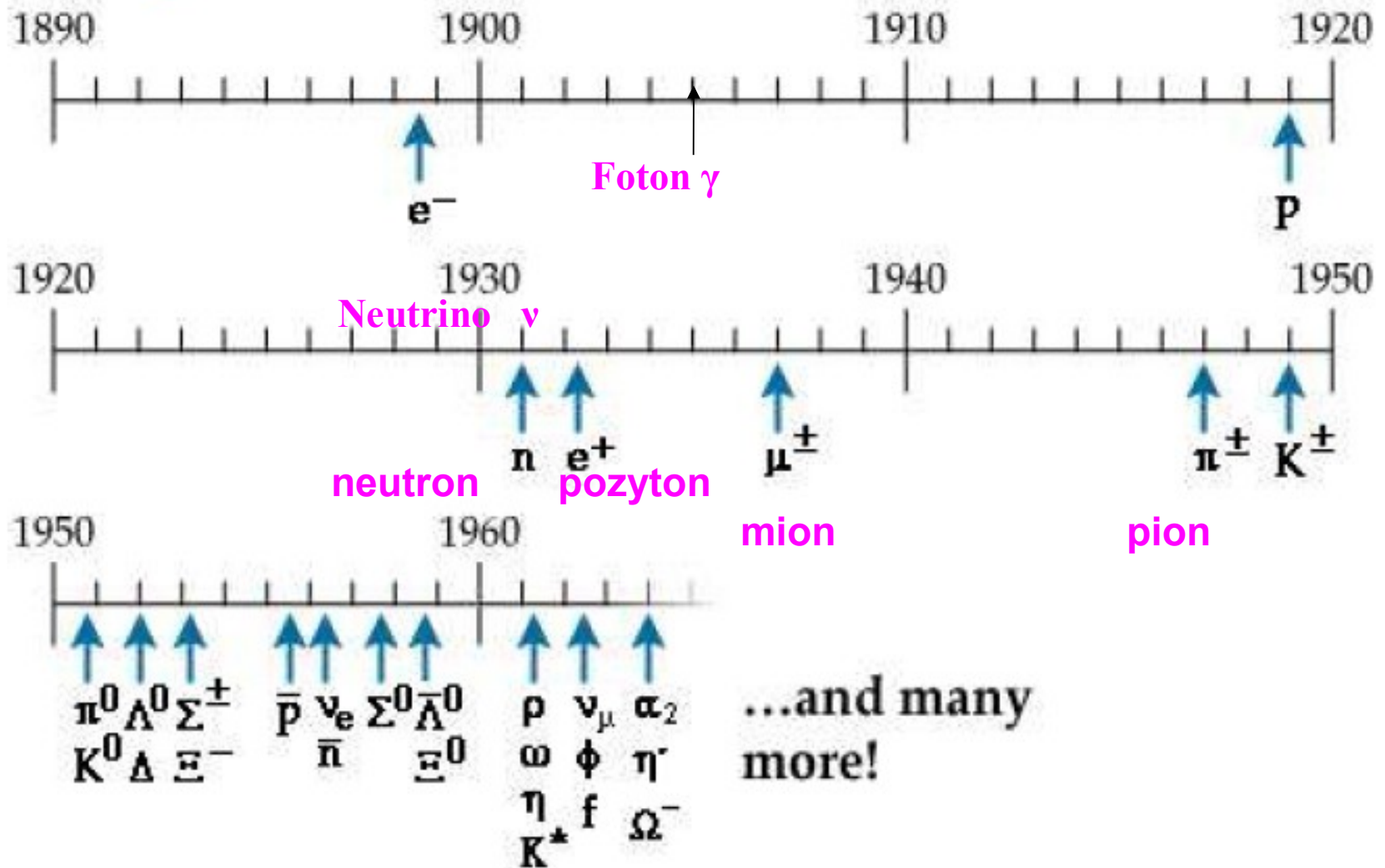
Uwięzienie to nowe zjawisko – czy to oznacza, że to koniec drabiny poziomów:

**cząsteczka → atom → jądro → nukleon → kwark?**

**Być może...**

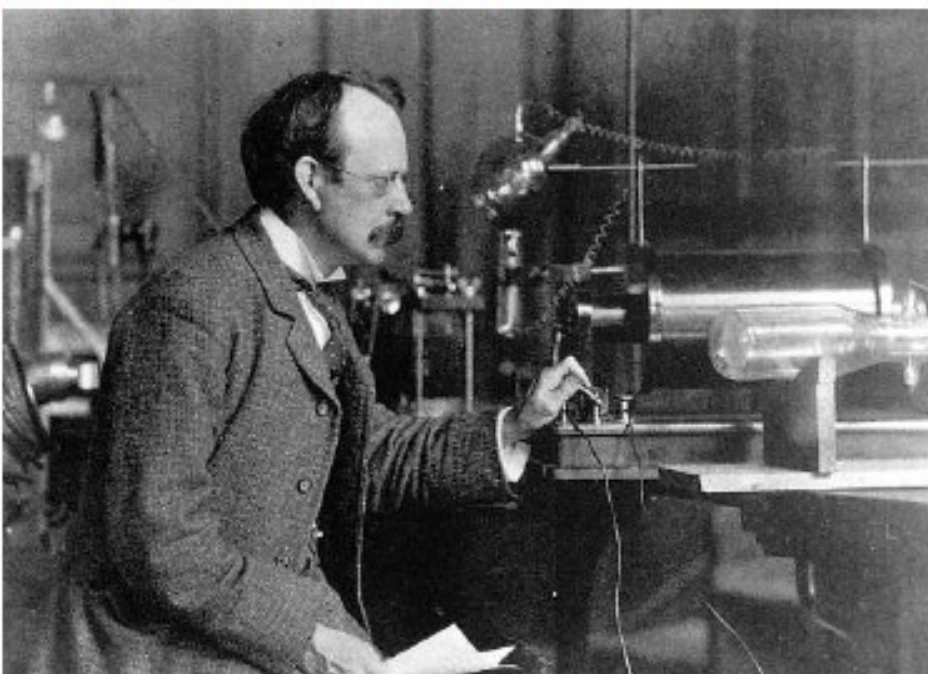


# Odkrycia cząstek elementarnych 'potop' w latach 50-60 XX w



# Odkrycie elektronu

**Joseph Thomson** 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym

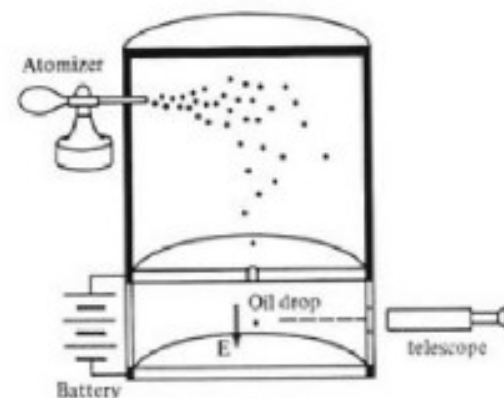
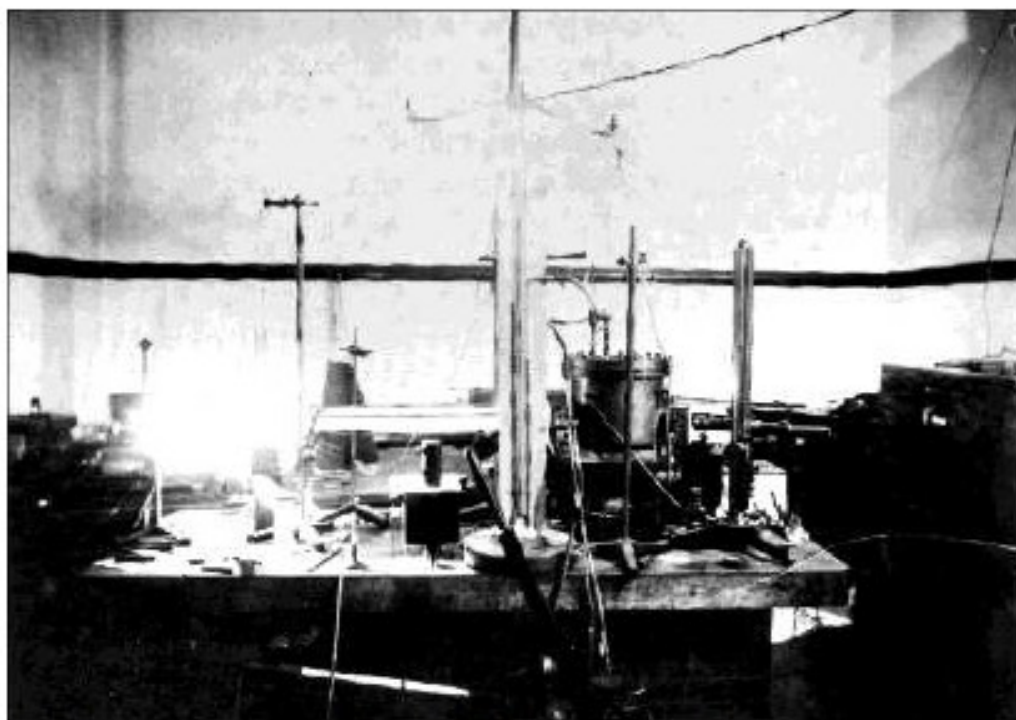
Wyznaczył stosunek ładunku do masy elektronu:

$$\frac{e}{m} \approx 2 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

# Odkrycie elektronu



**Robert Millikan** 1909



Mierząc opadanie maleńkich kropeł oliwy w powietrzu wyznaczył ładunek elektronu, a następnie obliczył jego **masę**:  $m_e = \frac{1}{1837}m_H$

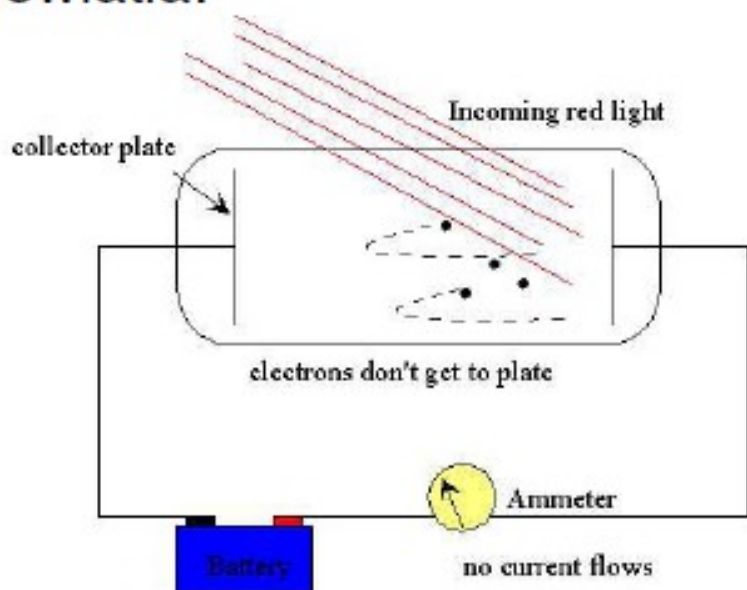
# Odkrycie fotonu

- doświadczenie

## Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887

W 1902 Philipp Lenard pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych długości fali światła:



Efektu tego nie można było wytłumaczyć w parciu o falową teorię światła

# Kwant - ur. w 1900, 14 grudnia

Max Planck zaproponował radykalne wyjaśnienie promieniowania cieplnego rozgrzanych ciał.

Z doświadczenia → całkowita energia promieniowania zależy tylko od temperatury.

„Klasyczny” opis dla idealnego źródła promieniowania ('ciało doskonale czarne') nonsensowny, bo prowadzi do wniosku, że źródło emituje nieskończoną energię („katastrofa w ultrafiolecie”).

Planck: dobry opis można uzyskać zakładając, że promieniowanie energii w paczkach (kwantach)

$$E = h \nu \quad (h - \text{stała Plancka, } \nu - \text{częstotliwość})$$

(ale według samego Plancka „to tragedia”..).

# Odkrycie fotonu

- teoria

## *Efekt fotoelektryczny*

W roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych kwantów **światła** które dziś nazywamy **fotonami**.

Ma pęd i energię jak cząstka!!

Energia fotonu:

$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Aby wybić elektron z metalu  $E_{\gamma}$  musi być większa od tzw. **pracy wyjścia**  $\Rightarrow$  zależność od długości fali światła



## Zuchwała hipoteza

- Max Planck nie popierał tej idei przeczącej teorii Maxwella - nawet w roku 1914 tłumaczył Einsteina z tego "wybryku" przed Pruską Akademią Nauk:

"Że on nieraz gubił się w swych spekulacjach, jak na przykład w swej hipotezie cząstek światła, nie może być używane przeciwko niemu, gdyż nie można wprowadzać naprawdę nowych idei, nawet w naukach ścisłych, bez podjęcia ryzyka. "

- Millikan był zakłopotany, że ona pasuje do wyjaśnienia pomiarów efektu fotoelektrycznego...

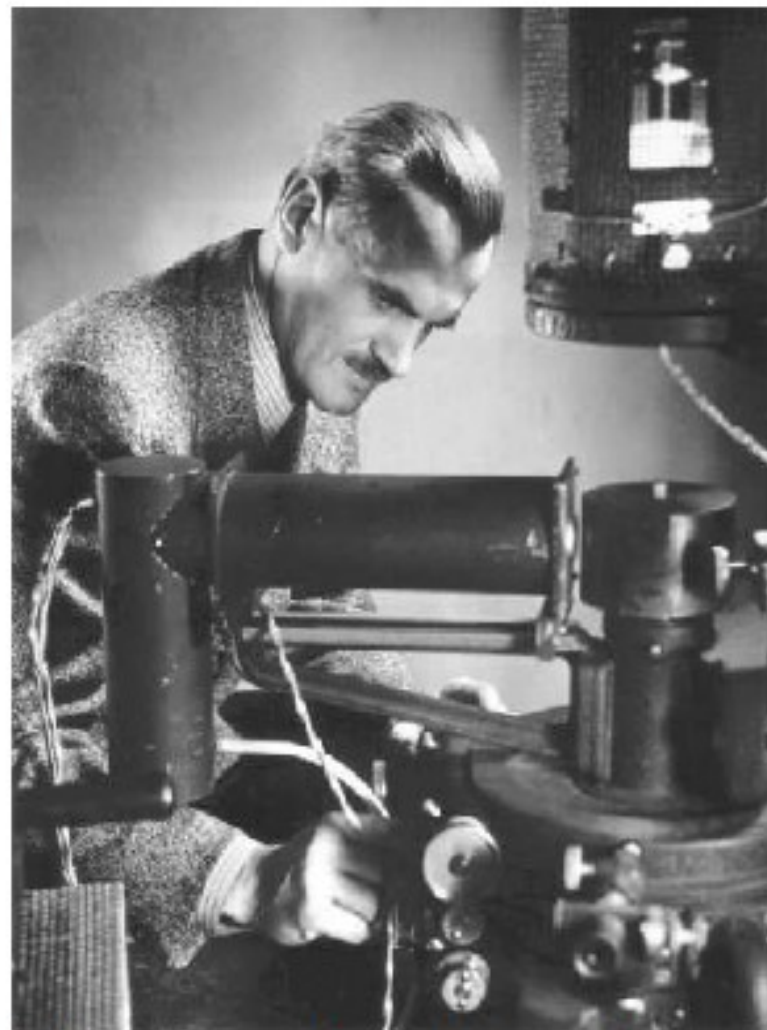
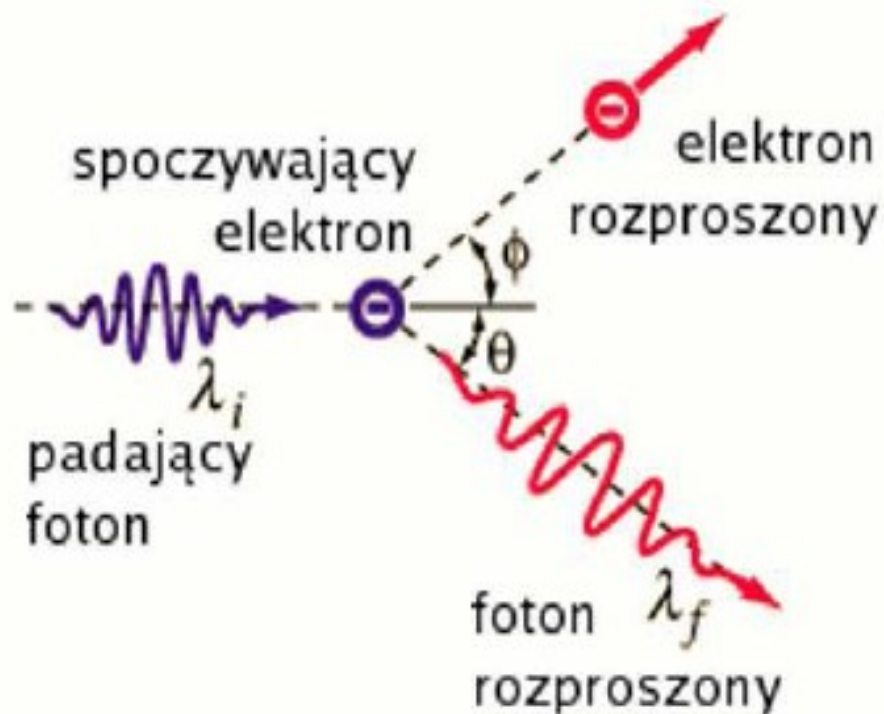
- Bohr - uważał "kwantowość " za własność atomów nie promieniowania (wolał zrezygnować z zachowania energii i pędu..)

- Środowisko w końcu zaakceptowało foton, szczególnie po doświadczeniu Comptona, w którym foton i elektron grają w bilard...

# Odkrycie fotonu

I znowu  
doświadczenie

**Arthur Compton** 1923  
Rozpraszanie fotonów na elektronach



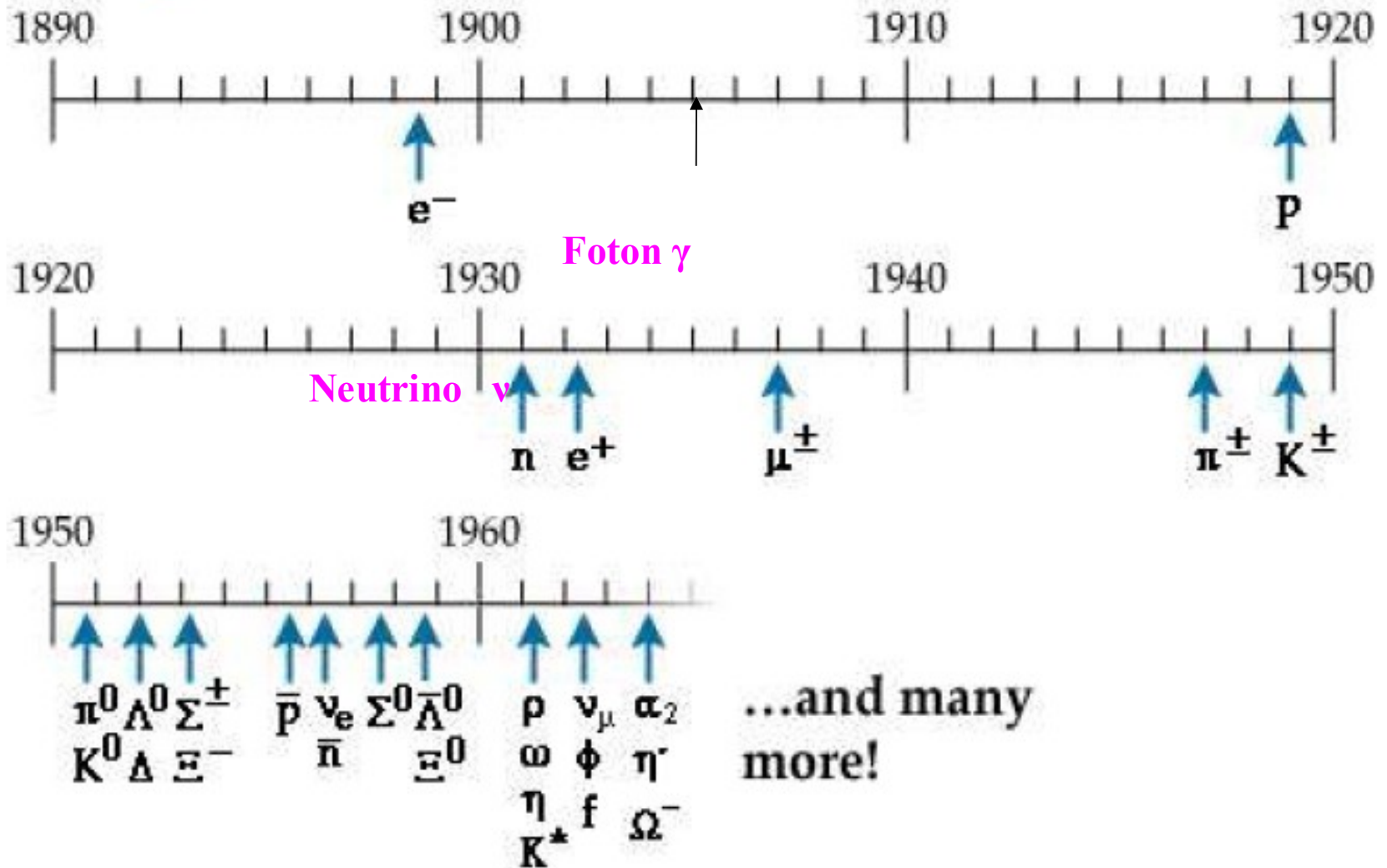
Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd**  
 $\Rightarrow$  zachowują się jak **cząstki**



## Light quanta - cząstki światła

- 1900 - Planck → kwant energii promieniowania elektromagnetycznego  $E = h\nu$  (nagroda Nobla - 1918 )
- 1905 - Einstein → kwant światła ( $\gamma$ ) - foton Einsteina :  $E = h\nu = pc$  (nagroda Nobla - 1922)
- 1915 - Millikan badał zjawisko fotoemisji z metalu (nagroda Nobla - 1923)
- 1922 - Compton (doświadczenie rozpraszania fotonów na elektronach  $\gamma e \rightarrow \gamma e$ ) (nagroda Nobla - 1927 )
- 1925-7 - Born, Heisenberg, Jordan, Dirac → (teoria oddziaływań elektromagnetycznych - elektrodynamika kwantowa QED; foton - bozon przenoszący oddziaływanie)
- (• 1926 - Lewis (chemik) → nazwał kwant światła - fotonem)
- 1931 - Wigner → opis własności związanych z momentem pędu - spinem; foton - spin  $1 \hbar/2\pi$

# 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.  $\tau$ )
  - 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  $\beta$** :

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)

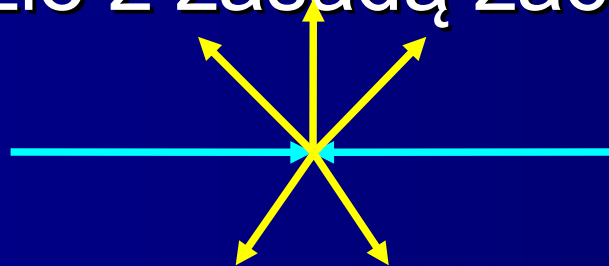
N. Bohr – może energia się nie zachowuje?

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

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

# Produkcja cząstek elementarnych

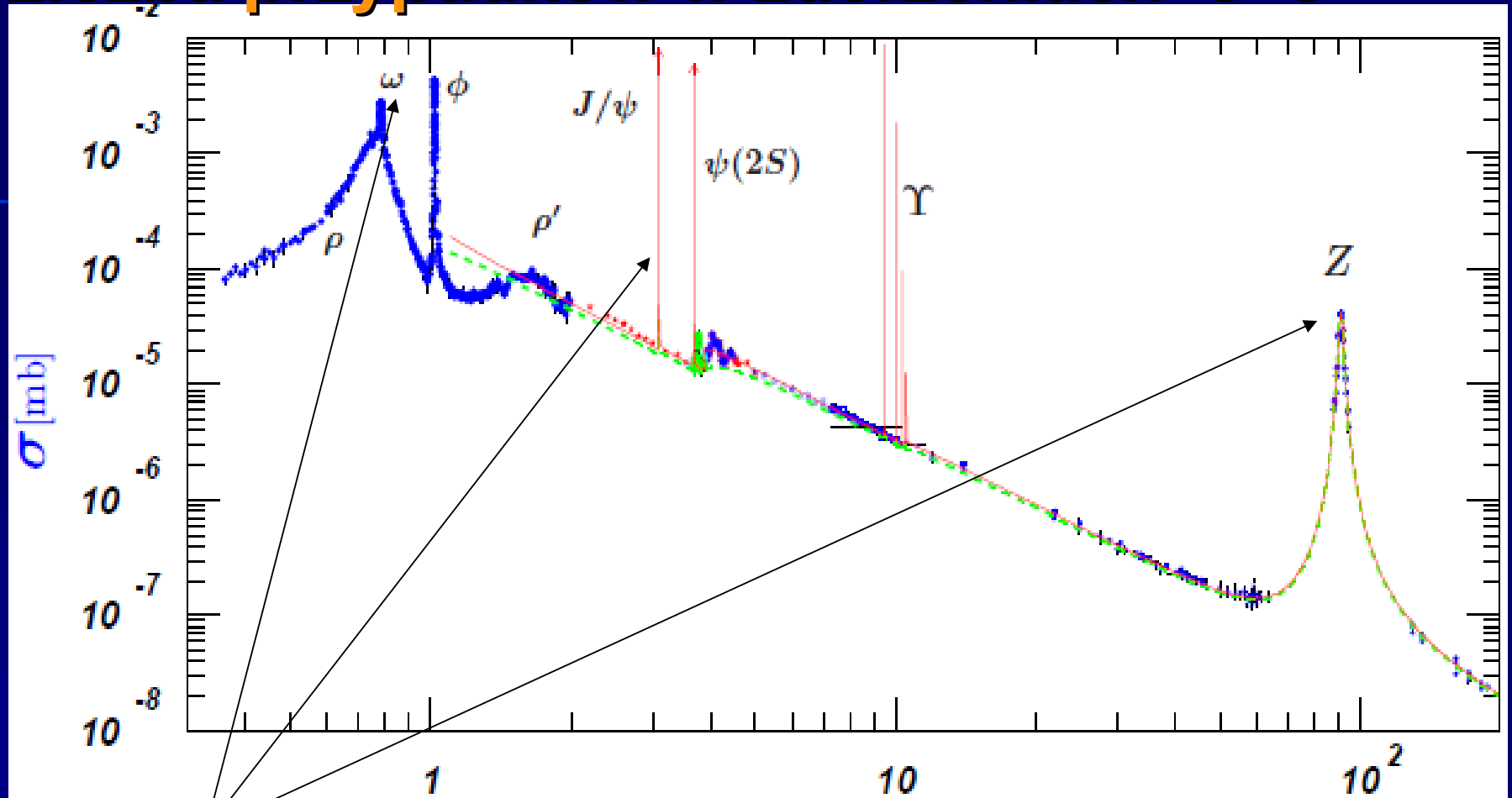
W zderzeniach cząstek danego typu może nastąpić produkcja dwóch, trzech,..N cząstek  
- zawsze w zgodzie z zasadą zachowania energii i pędu



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

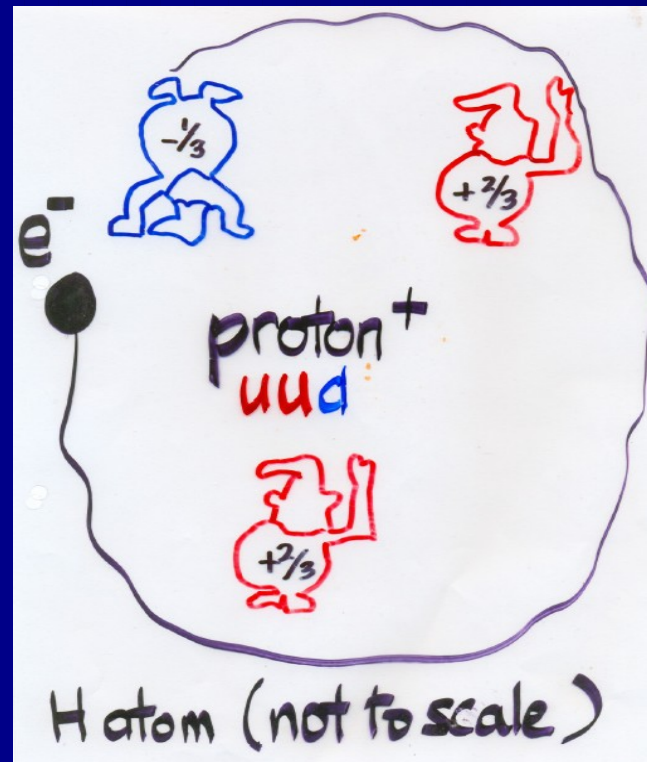
szerokość linii rezonansowej  $\Gamma \sim 1/\tau$

# 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 zmiana kwarku  $u$  na kwark  $d$  (i odwrotnie)*

# Cząstki dziwne

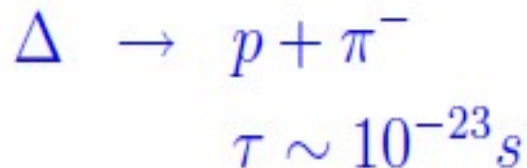
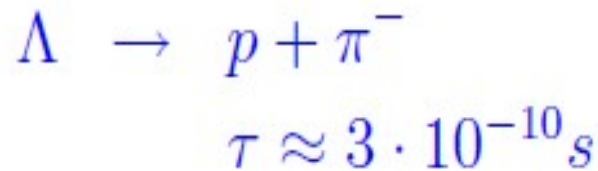
Cząstki dziwne  
odkryto w  
promieniowaniu  
kosmicznym  
~ 1950 r

potem w  
laboratoriach



# Cząstki dziwne

Czas życia  
znacznie dłuższy  
od spodziewanego



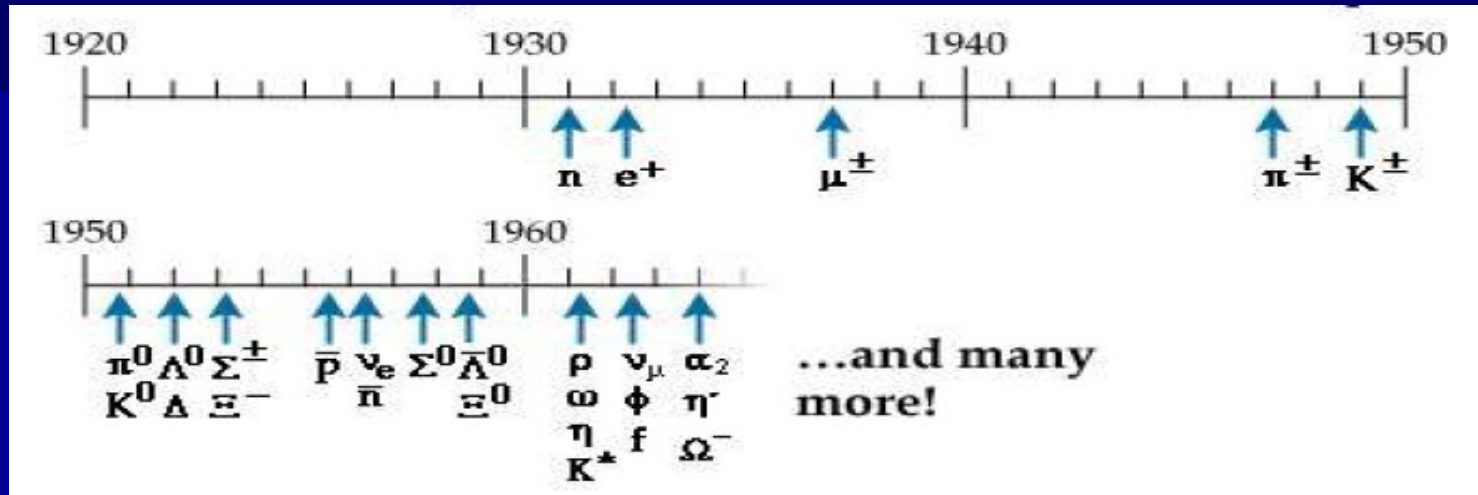
Produkcja i rozpad cząstki  $\Lambda$ :



Dziwne też to, że produkują się  
tylko parami!

Aby opisać wprowadzono nową liczbę kwantową dziwność S

# Model kwarkowy



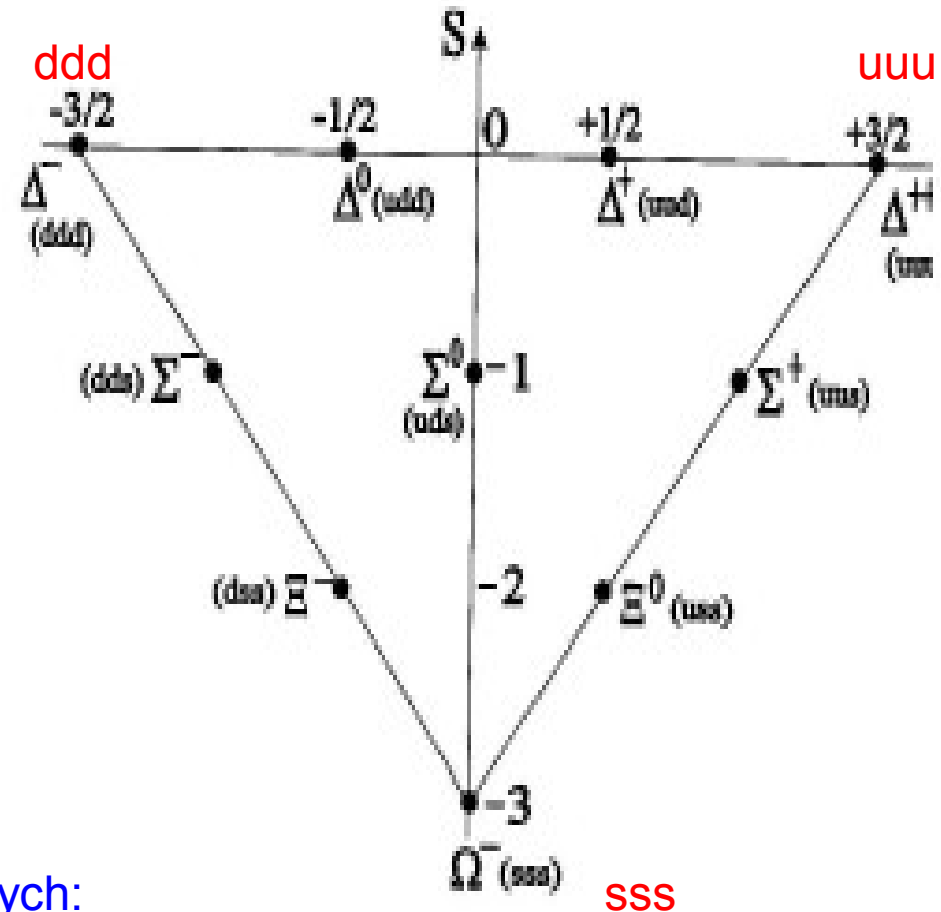
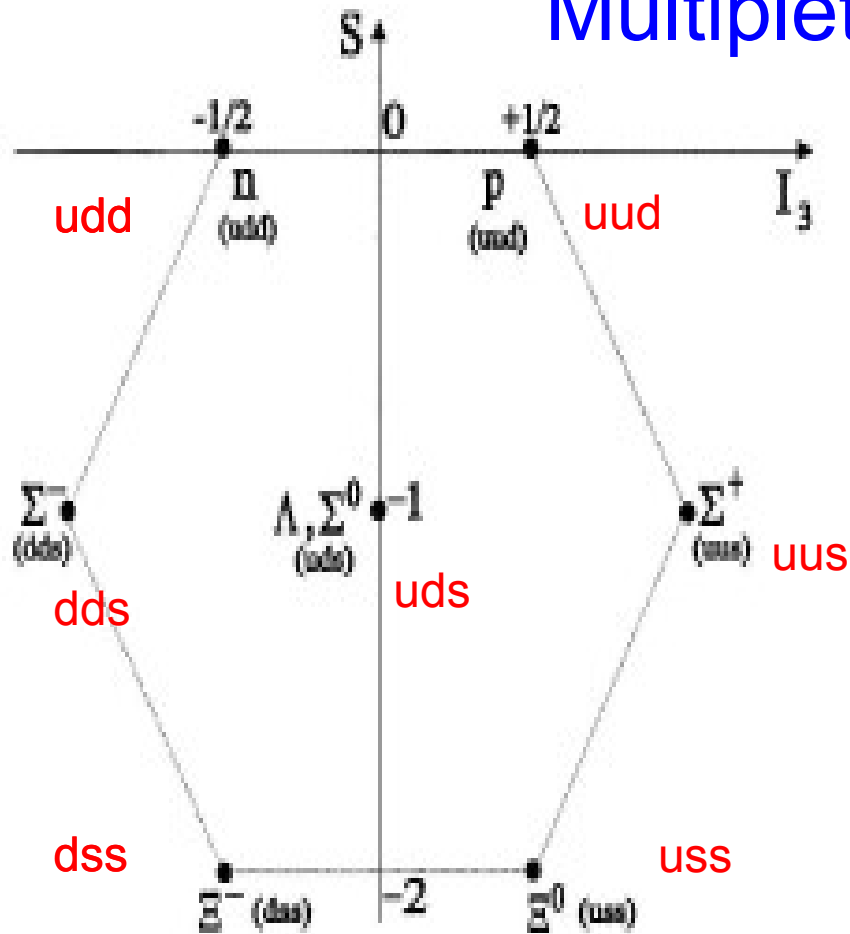
Lata 60-te XXw zaobserwowano grupy cząstek o podobnych masach (multiplety cząstek)

( $\rightarrow$  następny slajd)

Gell-Mann i Zweig: jakaś nowa symetria?...

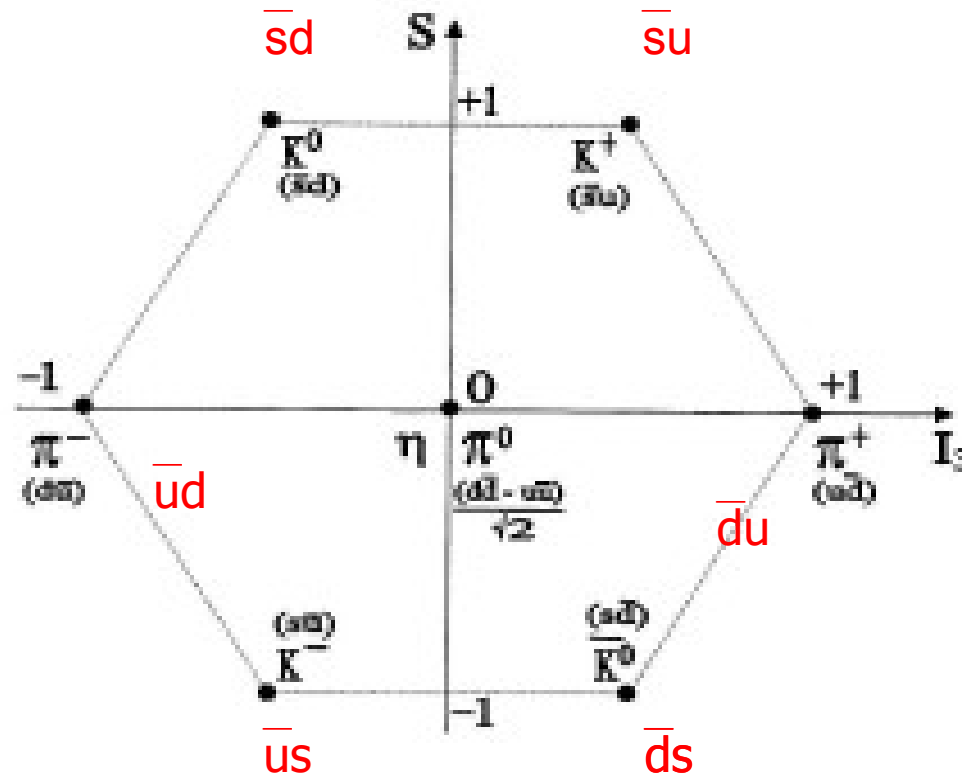
hipoteza kwarków

# Multiplety cząstek



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

# Multiplet cząstek ( $q \bar{q}$ )



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  $c$

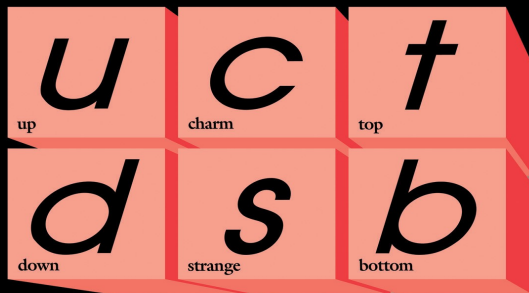
piękno (beauty, bottom)  $B^*$  – kwark  $b$

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

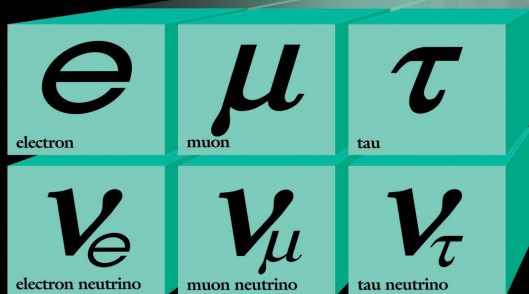
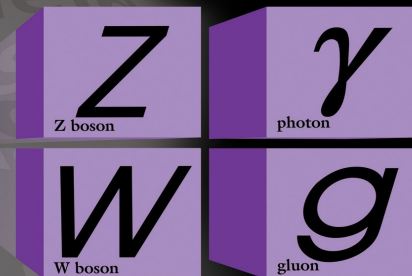
- $C$  Np. cząstka  $J/\psi$  o masie 3 GeV. W 1974 odkryto b. wąski rezonans. Dlaczego taki wąski (mała szansa rozpadu)? Nie ma na co się rozpaść? Może zawiera nowy typ kwarków? Dziś wiemy  $J/\psi = c \bar{c}$ ; rozpad na 'zwykłe' cząstki trudny-przez 3 gluony. Dla  $J/\psi$   $C = 0$ , ale są cząstki z  $C = \pm 1$  np.  $D^+ = c \bar{d}$ . Masa kwarku  $c = 1.3$  GeV.
- $B^*$  Podobnie cząstka  $\Upsilon$  (9.5 GeV) stan związany  $b \bar{b}$  ( $B^* = 0$ ). (odkrycie 1977r). Masa kwarku  $b = 4.5$  GeV. Są cząstki z  $B^* \neq 0$ .
- $T^*$  Masa kwarku  $t = 170$  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:  $m_p=938.3 \text{ MeV}$  ,  $m_n=939.5 \text{ MeV}$ ,  $\Delta m=1.3 \text{ MeV}$   
→ 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 masy;  
bardziej masywne cząstki mają więcej szans na rozpad

- Zasada zachowania energii – ściśle przestrzegana przez Naturę

Przykład rozpadu neutronu: bilans masy  
( $939.5 - [938.3 + 0.511 + 0] = 0.80$ )  $\text{MeV}/c^2$

→ 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



# 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  $\nu_e$  (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  $\nu_e$  to:

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

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

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

**LEPTONY:** (*lepton* - „lekki”)

**elektron, mion, taon i ich neutrina**

Analogicznie do  $L_e$  wprowadzamy

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

# Liczba leptonowa L

Liczba leptonowa = suma  
indywidualnych liczb leptonowych

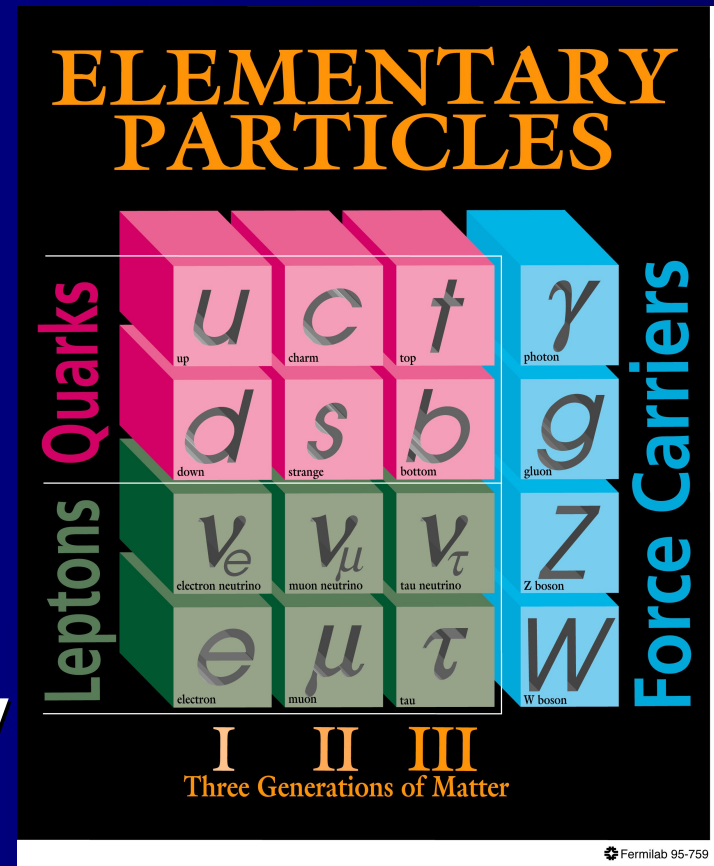
$$L = L_e + L_\mu + L_\tau$$

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



# Model Standardowy

**Kwarki (wszystkie) :**

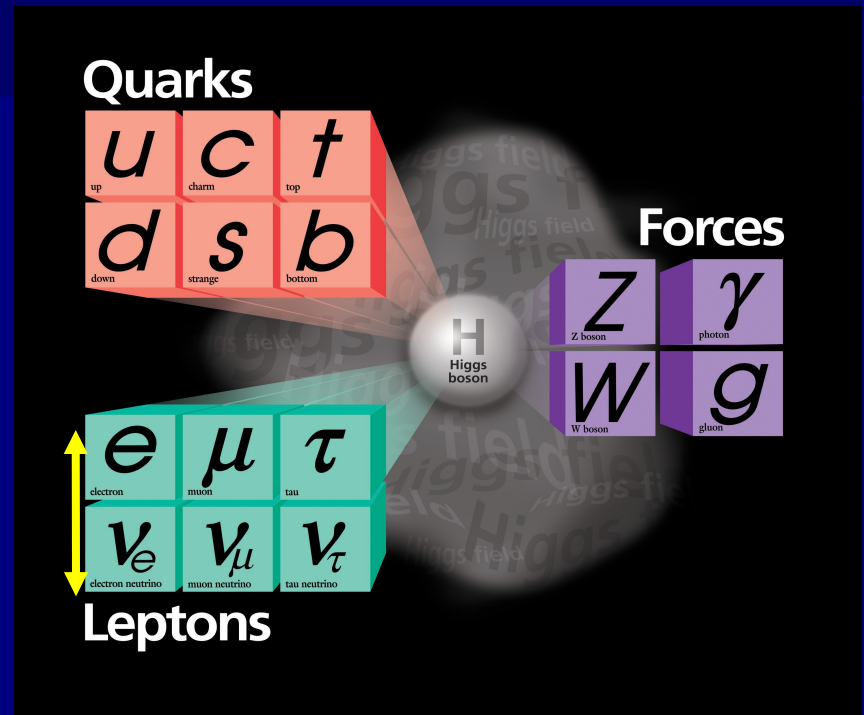
**I. barionowa  $B=1/3$**

**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...) - klasyfikacja cząstek

kolor - 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.” (→ *elektrodynamika kwantowa*), gluon „czuły” na ładunek kolorowy (oddziałuje z.., sprzęga się do..

→ *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 taonowa antyneutrino mionowego?

Wypisz jedną reakcję skrzyżowaną do rozpadu beta neutronu.