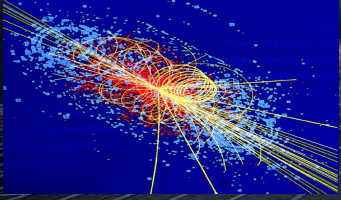


Wszechświat cząstek elementarnych dla przyrodników



WYKŁAD 3

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

3.III.201

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)
- 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 2010 (<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) !

najmniejsze 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}

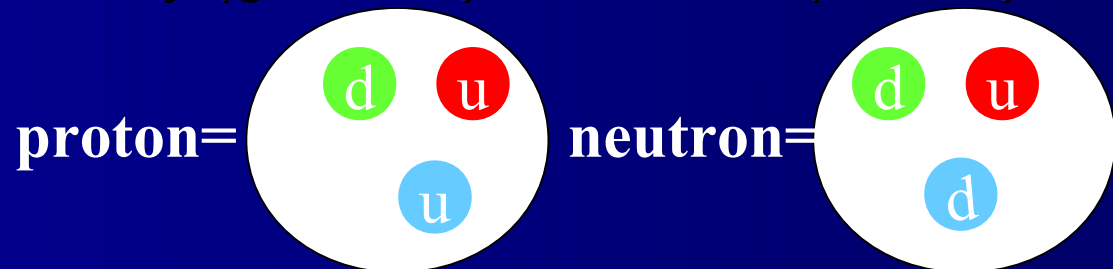
Nukleony i zwykłe kwarki (oraz klej czyli gluony)

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..

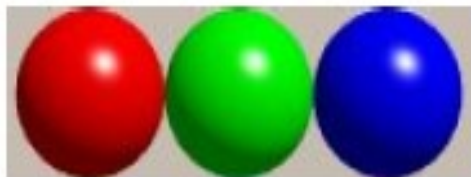
Ale nie występują jako cząstki swobodne – **są uwiezione!**

W nukleonach są *gluony (kolorowe) sklejające całość*

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

Kolor

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

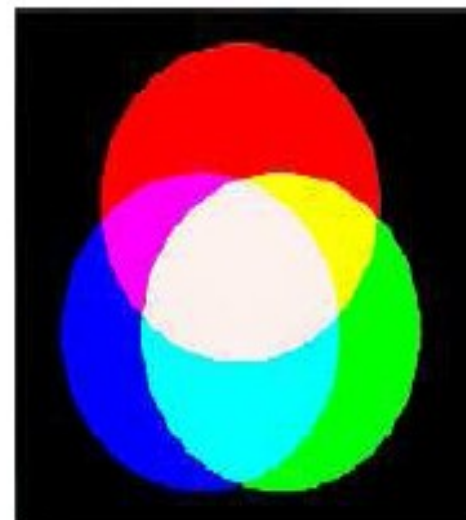


Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”): \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} .



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”?!

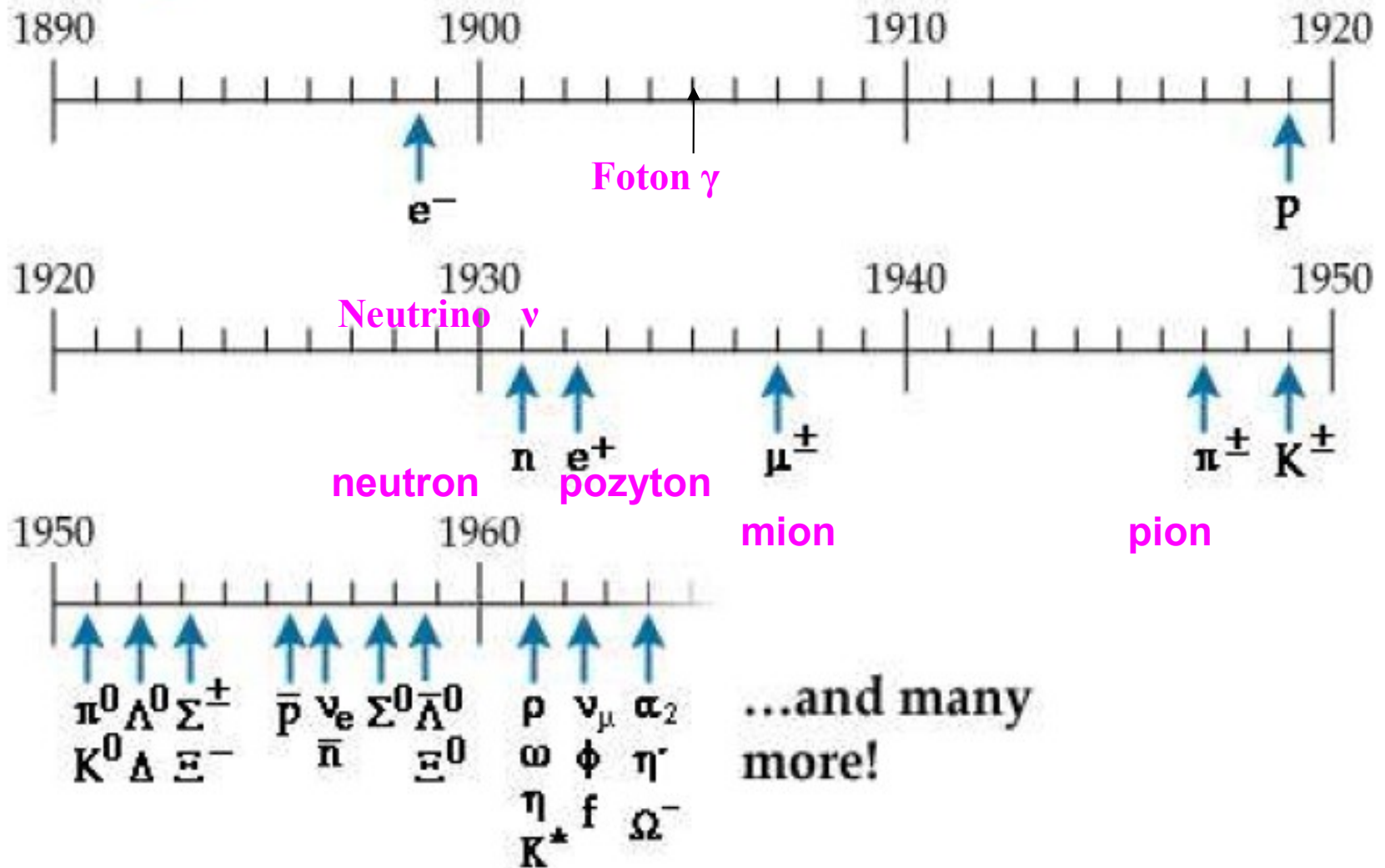
Kwarki i gluony są kolorowe, ale na stałe uwięzione w cząstkach „białych” (niekolorowych) typu (qqq) lub $(q \bar{q})$

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

cząsteczka → atom → jądro → nukleon → kwark?

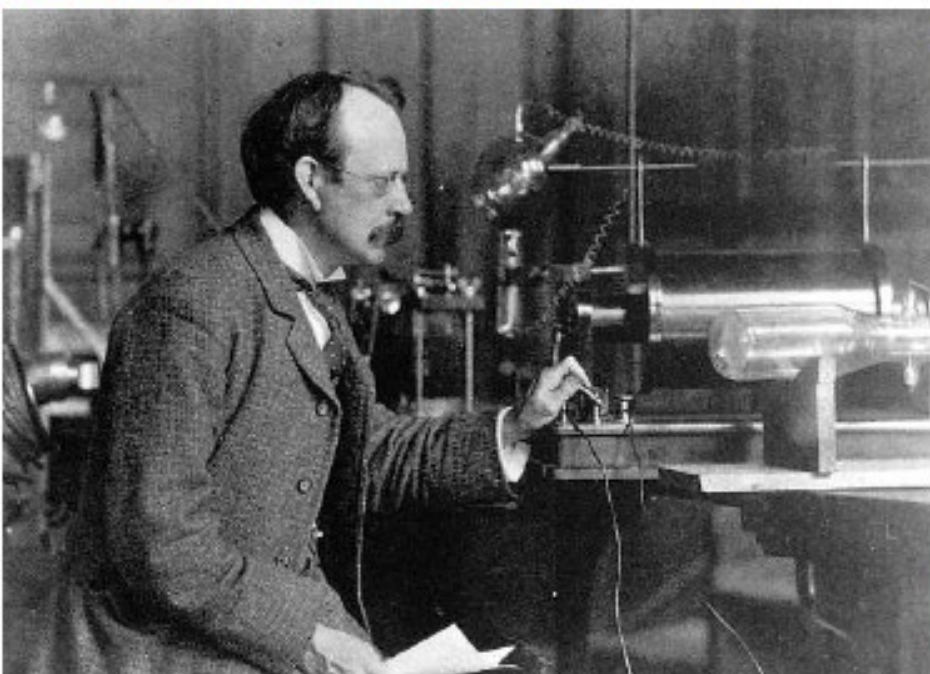
Być może...

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

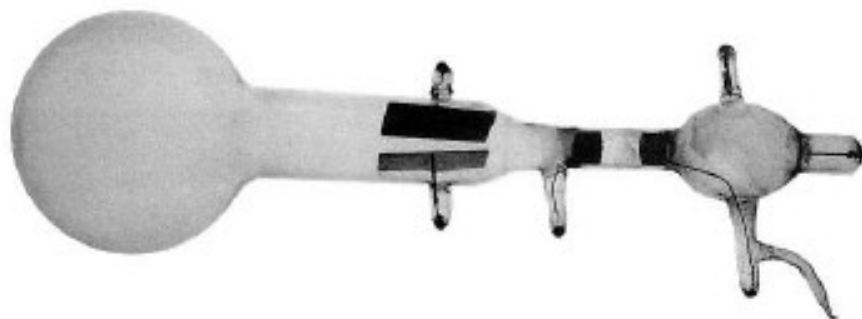


Odkrycie elektronu

Joseph Thomson 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym

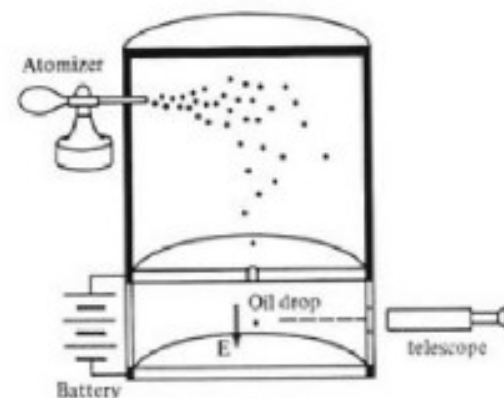
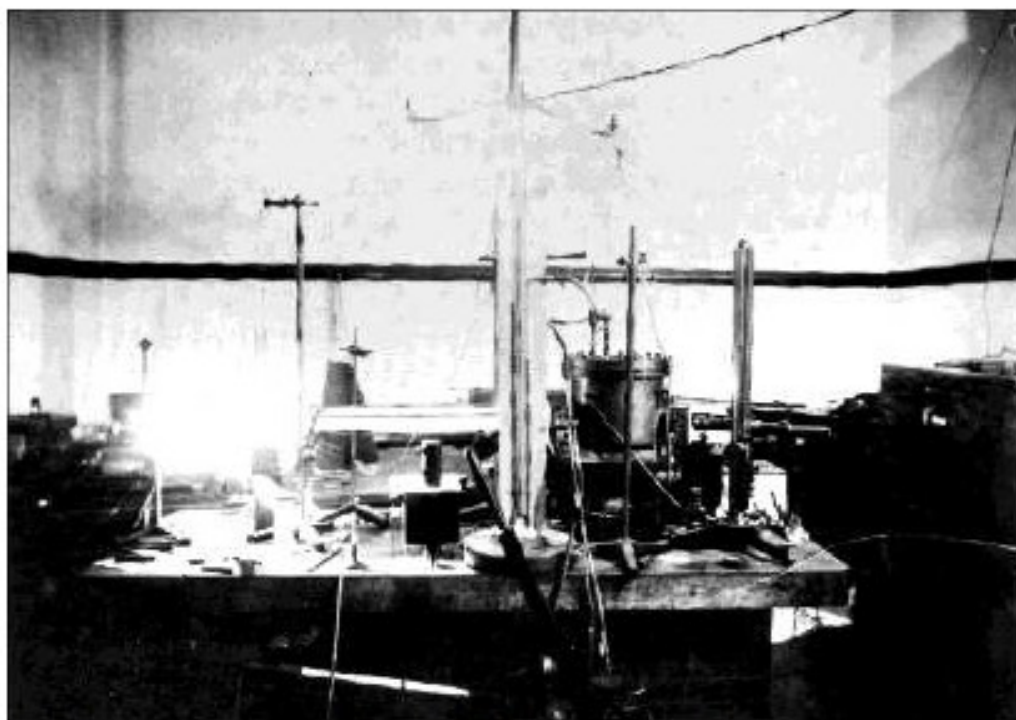
Wyznaczył stosunek ładunku do masy elektronu:

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

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

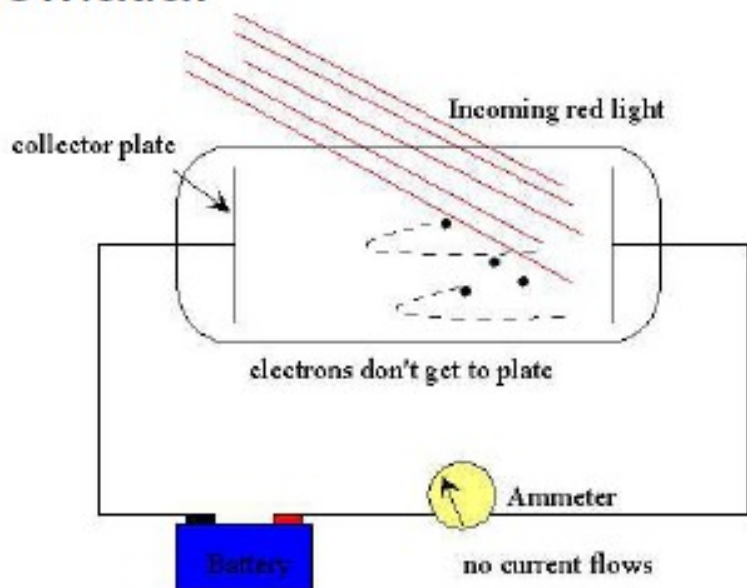
- doświadczenie



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_{γ} 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...

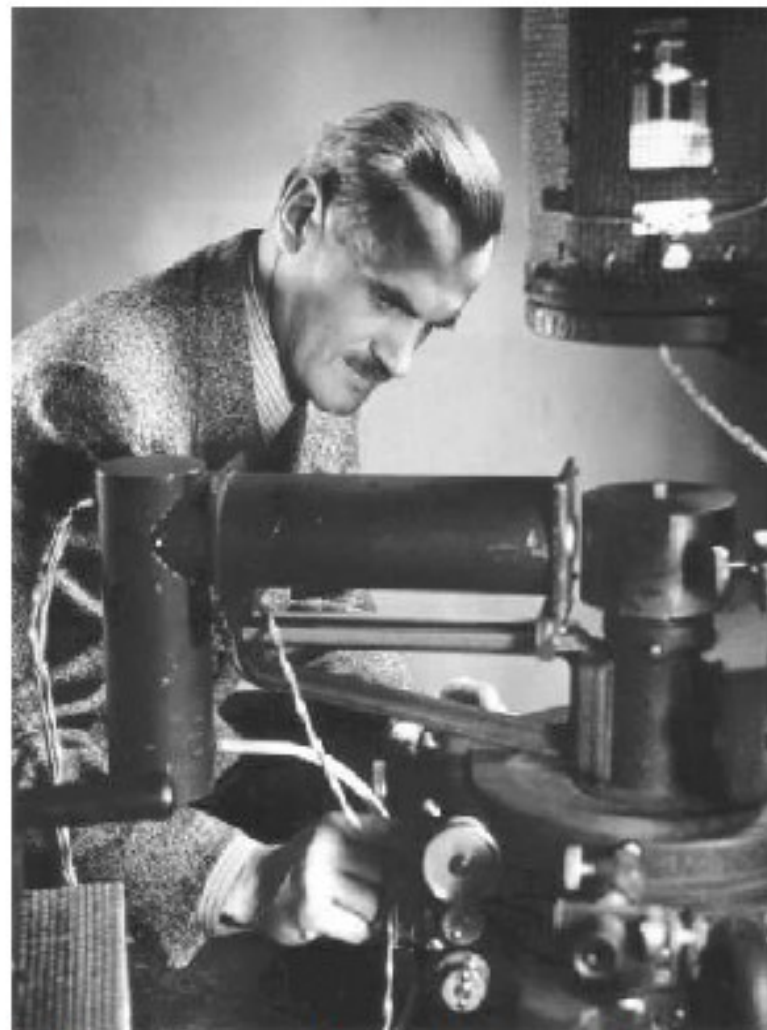
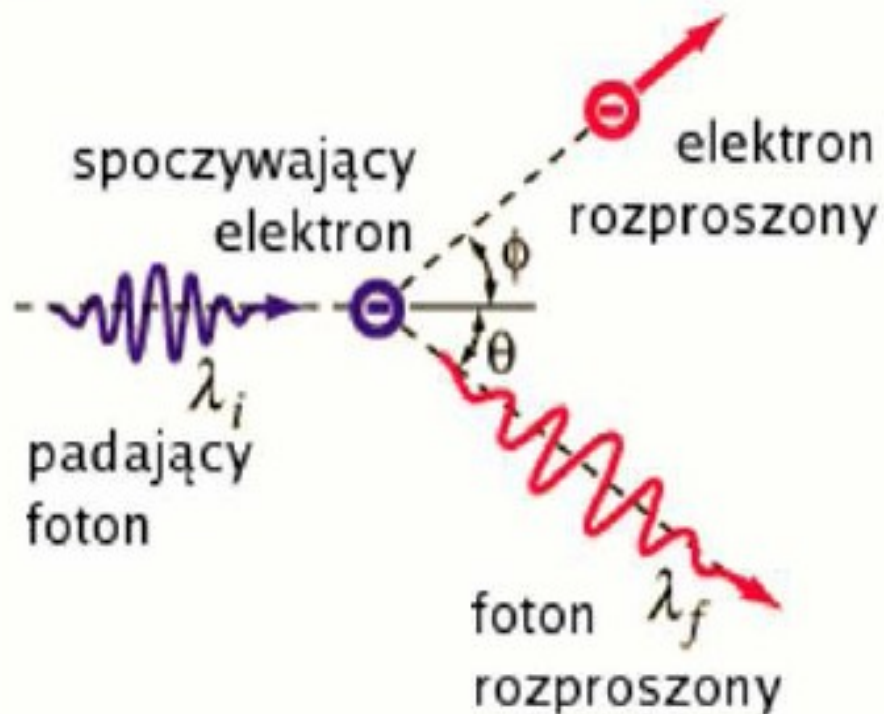
Light quanta - cząstki światła

- 1900 - Planck → kwant energii promieniowania elektromagnetycznego $E = h\nu$ (nagroda Nobla - 1918)
- 1905 - Einstein → kwant światła (γ) - 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 właściwości związanych z momentem pędu - spinem; foton - spin $1 \hbar/2\pi$

Odkrycie fotonu

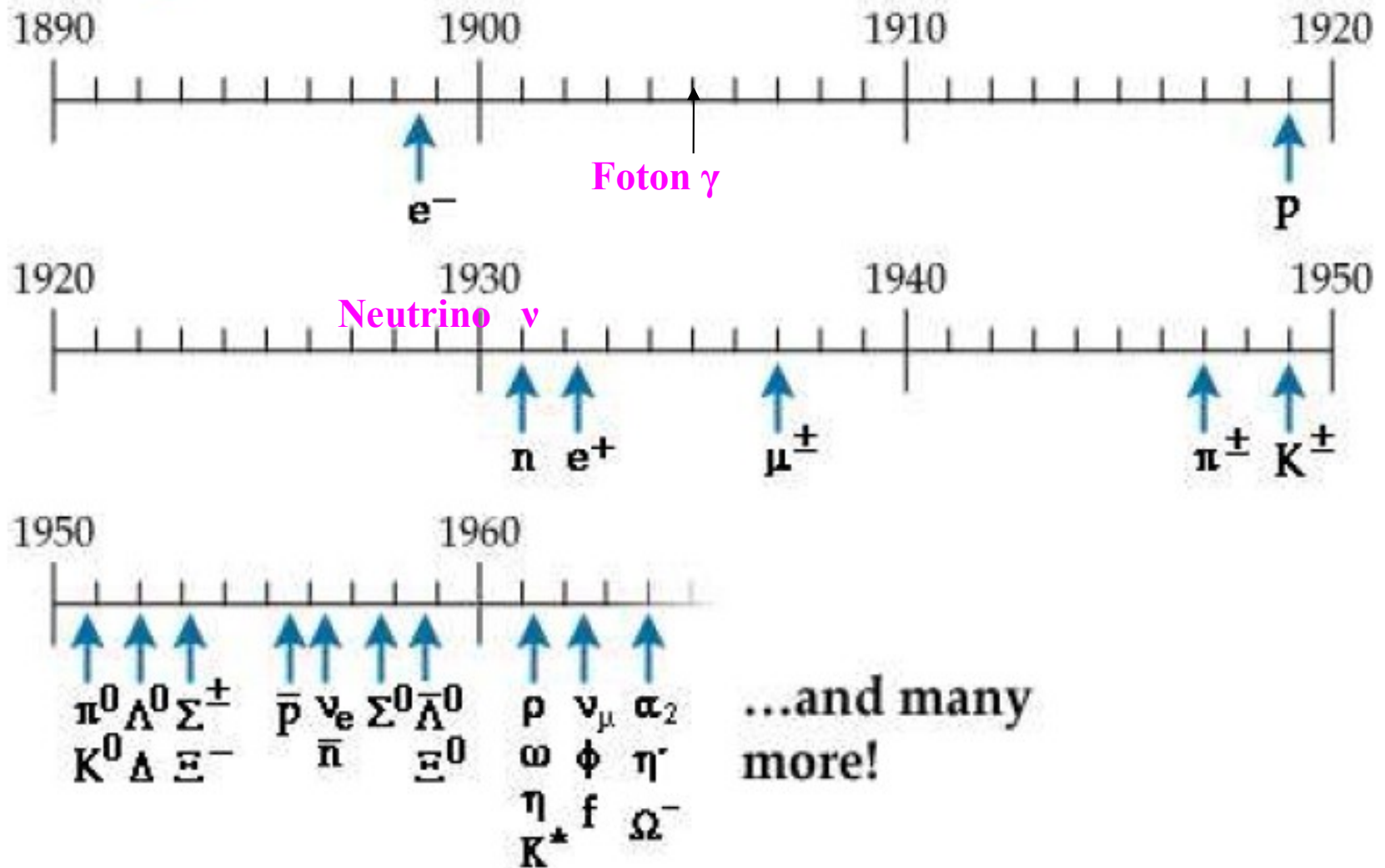
I znowu
doświadczenie

Arthur Compton 1923
Rozpraszanie fotonów na elektronach



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

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)

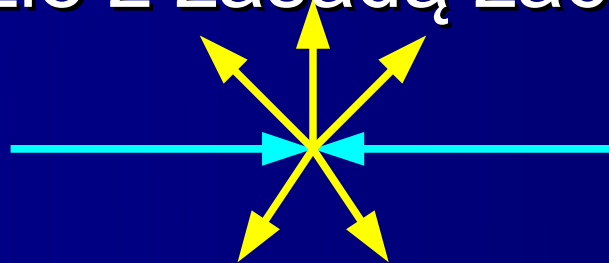
N. Bohr – może energia się nie zachowuje?

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

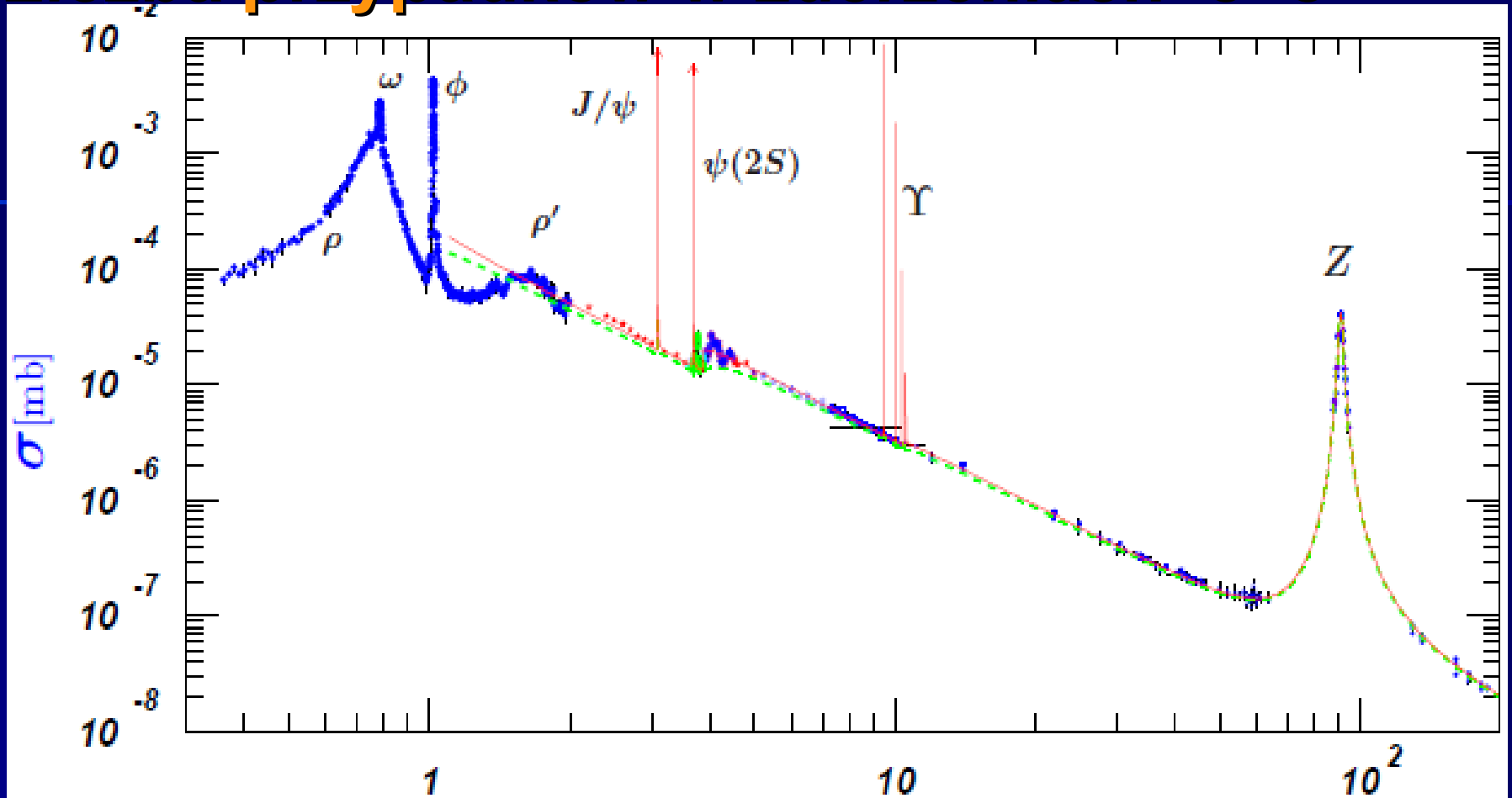


Energia zderzenia może się zamienić całkowicie na energię spoczynkową jednej nowej cząstki, zgodnie z $E=mc^2$ - produkcja rezonansowa -



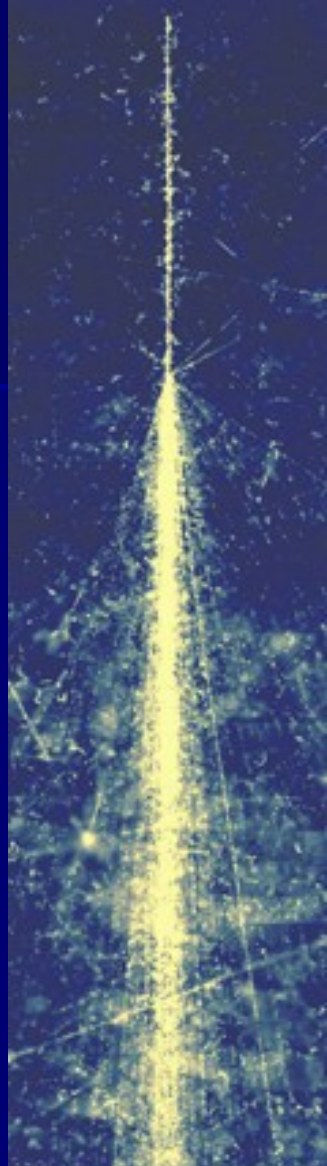
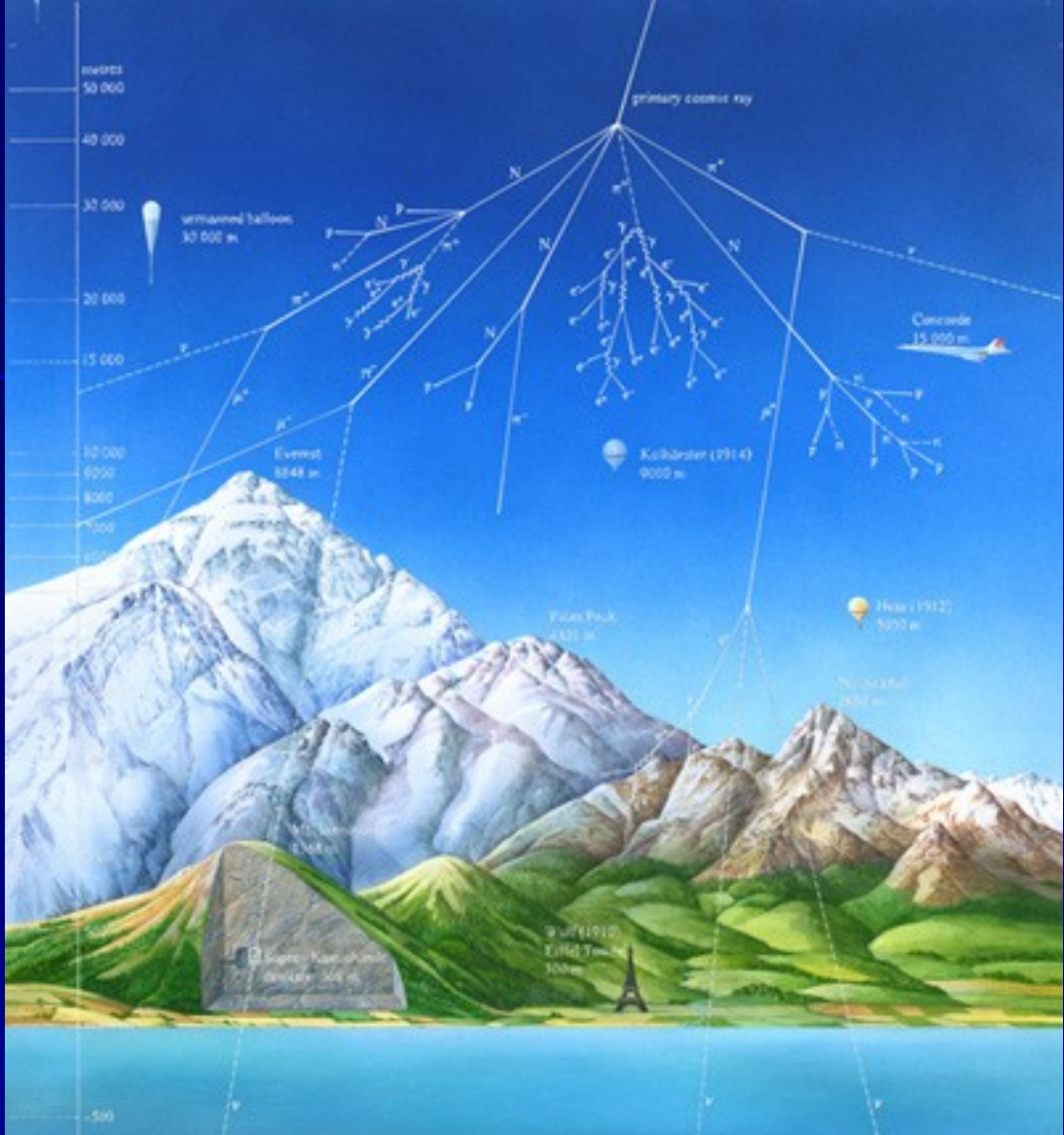
tak odkryto wiele cząstek

Liczba przypadków w zderzeniach e^+e^-



Rezonans:

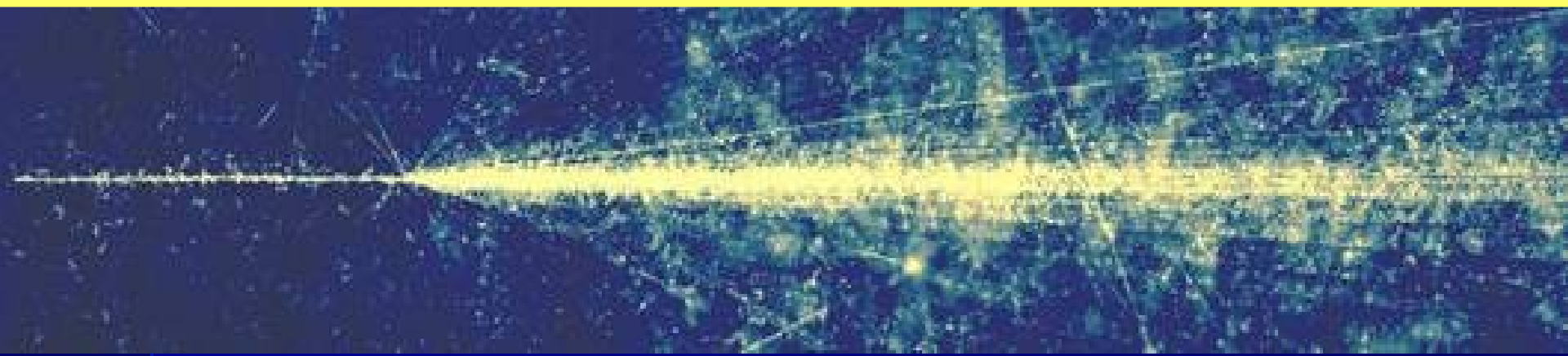
energia zderzenia (GeV) = masa cząstki
szerokość linii rezonansowej $\Gamma \sim 1/\tau$



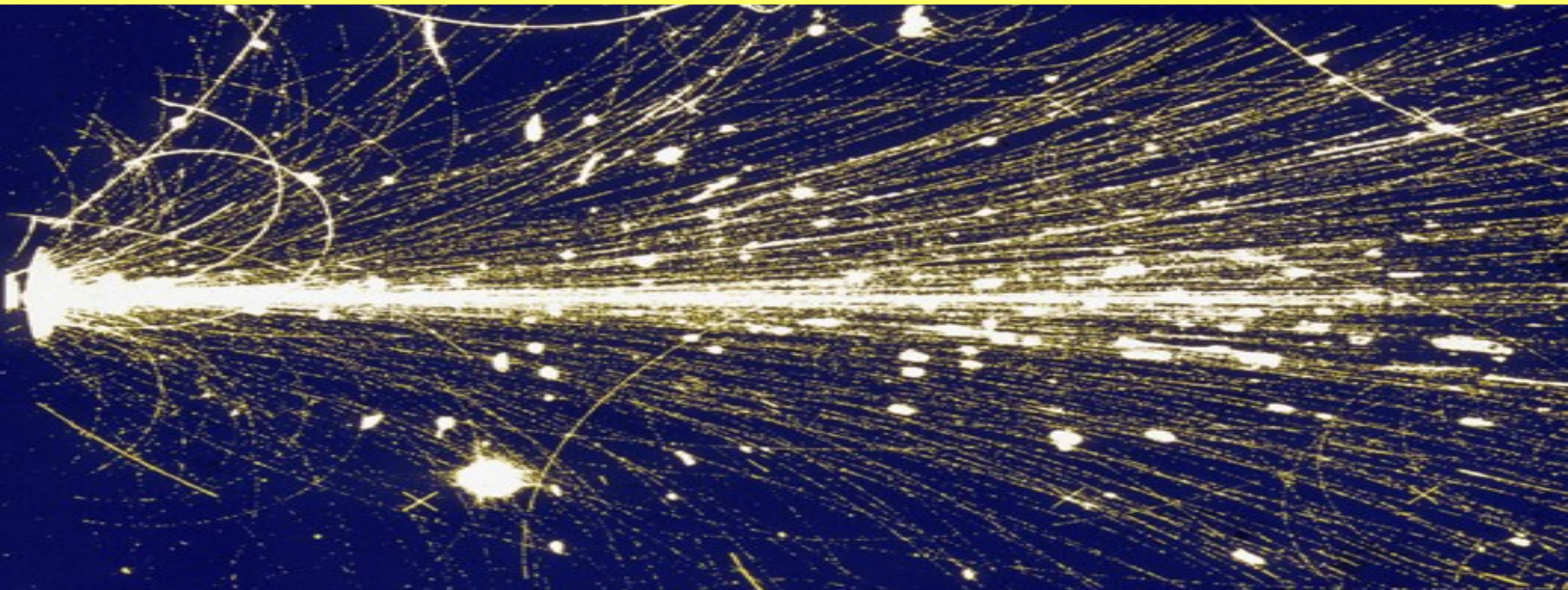
Zderzacz kosmiczny: w promieniowaniu kosmicznym odkryto wiele nowych cząstek w tym cząstki **dziwne**

Close

1955 CERN accelerators replicate cosmic rays on Earth...



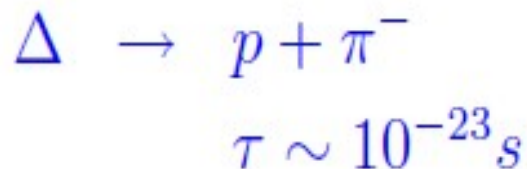
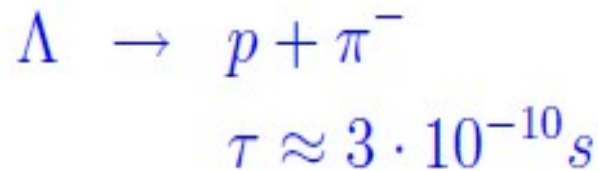
..record the images and reveal the real heart of matter....



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

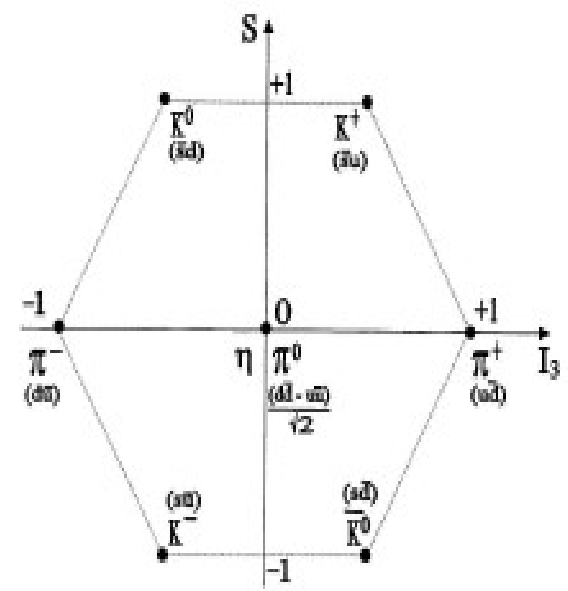
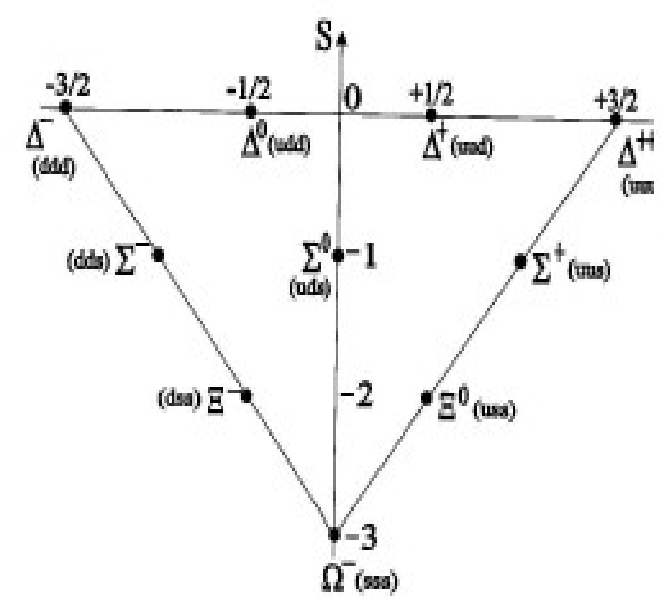
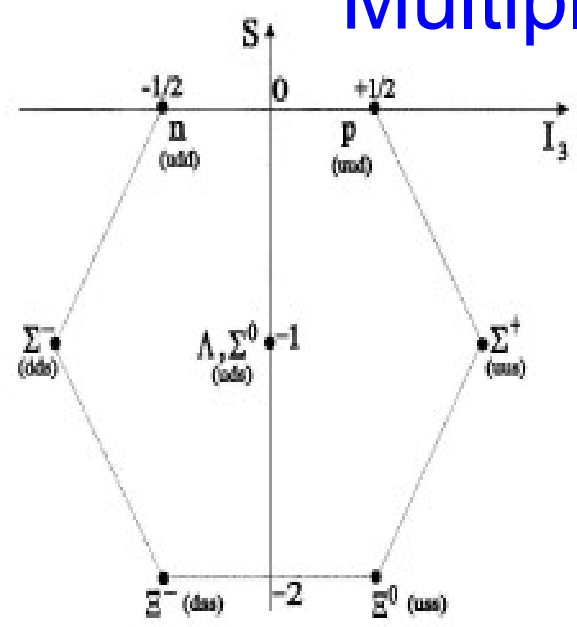
Model kwarkowy

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

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 ??

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.

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

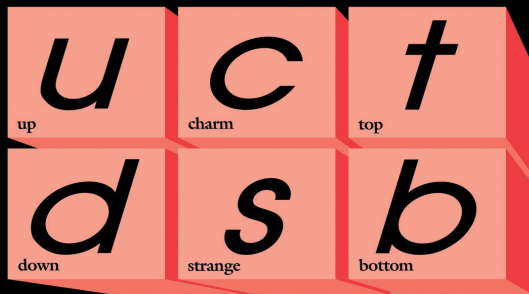
piękno (beauty, bottom) B^* – kwark b

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

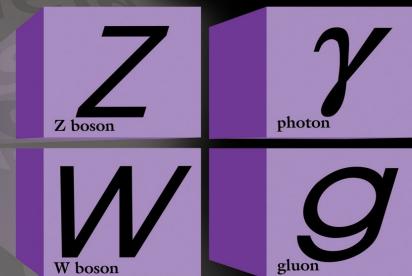
- Np. cząstka J/ψ o masie 3 GeV. W 1974 odkryto b. wąski rezonans (\rightarrow slajd 7). Dlaczego taki wąski (mała szansa rozpadu)?? Nie ma na co się rozpaść? Może zawiera nowy typ kwarków? Dziś wiemy $J/\psi = c \bar{c}$; rozpad na 'zwykłe' cząstki trudny-przez 3 gluony. Dla J/ψ $C = 0$, ale są cząstki z $C = \pm 1$ np. $D^+ = c \bar{d}$. Masa kwarku $c = 1.3$ GeV.
- Podobnie cząstka Υ (9.5 GeV) (\rightarrow slajd 7) stan związany $b \bar{b}$ ($B^* = 0$). (odkrycie 1994r). Masa kwarku $b = 4.5$ GeV. Są cząstki z $B^* \neq 0$.
- Masa kwarku $t = 170$ GeV \rightarrow t nie tworzy układów związanych.

Nośnikami liczb kwantowych zapachowych są kwarki

Quarks



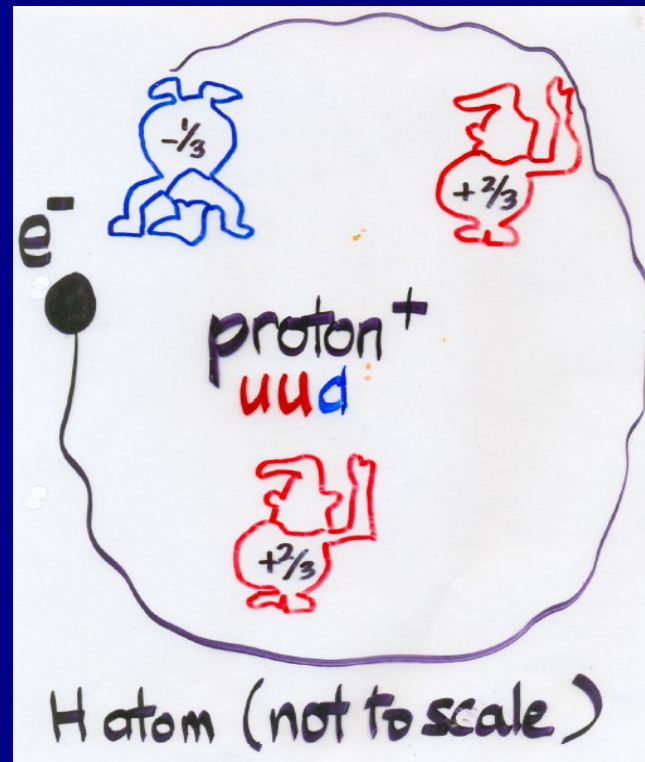
Forces



Leptons

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

Prawa zachowania

Zasada zachowania energii

W każdej reakcji (zderzeniu, rozpadzie):

energia końcowa = energia początkowa

- Każda cząstka o masie m ma z nią związaną energię

$$E=mc^2$$

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
($939.5 - [938.3 + 0.511 + 0] = 0.80$) 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 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.
(\rightarrow 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



Więc co zabrania?

- Stückelberg (1938) – nowy pomysł:

inna liczba kwantowa (i jej zachowanie)

- Doświadczalne potwierdzenie tej hipotezy-
testy np. dlaczego neutron nie rozpada się na: $e + \bar{e}$?

Nowa (addytywna) liczba kwantowa: liczba barionowa

Proton=+1, neutron=+1 ($\bar{p}, \bar{n} = -1$), pozostałe = 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)

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:



- Proces „skrzyżowany (crossing)”: $\nu_e n \rightarrow p e$

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

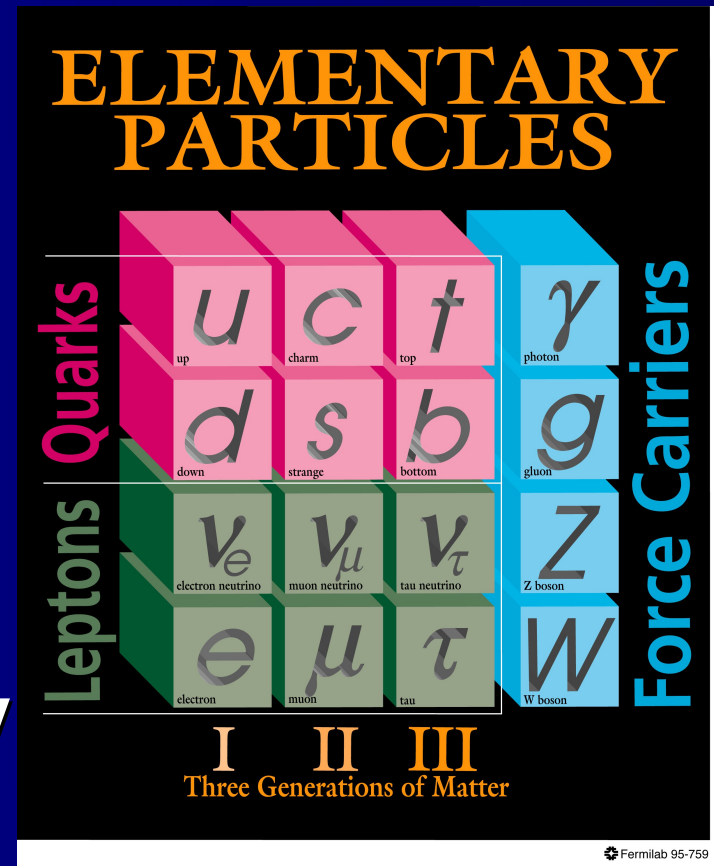
Liczba leptonowa = suma
indywidualnych liczb leptonowych

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

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) :

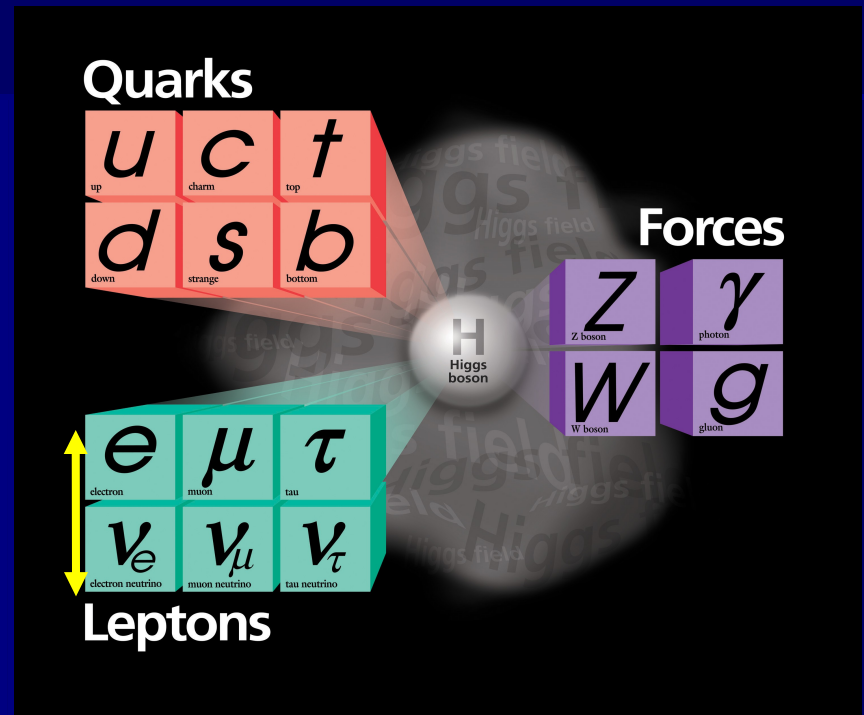
I. barionowa $B=1/3$

Leptony (wszystkie) :

I. leptonowa $L = 1$

Antykwarki $B= -1/3$

antyleptony $L= - 1$



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