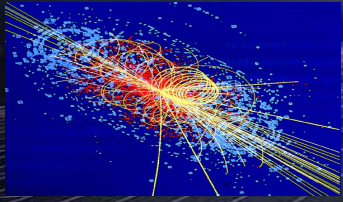


Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 7

2₁IV.2009

TEORIA

Symetria i jej łamanie

CEL

.. dotrzeć do tych uniwersalnych elementarnych praw przyrody, z których kosmos może być zbudowany przez czyste wnioskowanie.

I want to know how God created this world. I am not interested in this or that phenomenon.. I want to know His thoughts, the rest are details.

Albert Einstein

Są prawa i prawa

W fizyce wiele praw fenomenologicznych typu
prawa Hooke'a:

*Siła z którą ściskamy metalową sprężynę jest
tym większa im bardziej ściśnięta jest sprężyna.*

W latach 30-tych XXw → to wynika z własności
oddziaływań elektromagnetycznych w metalu.

Opis fundamentalny → jak najmniej prostych praw

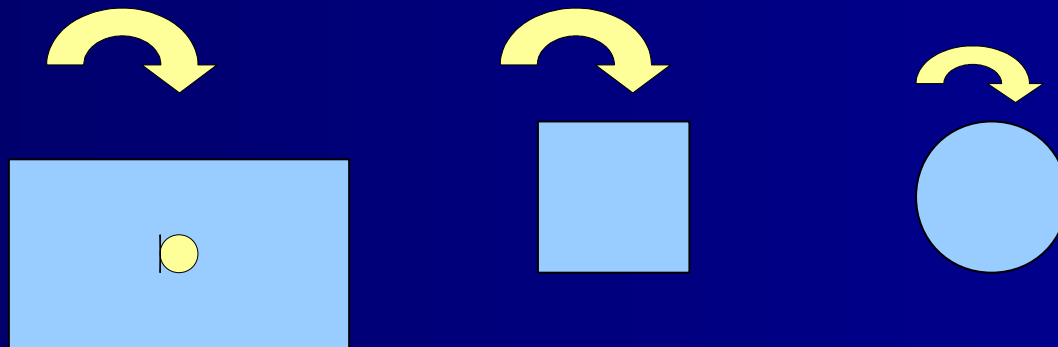
Piękno w fizyce = symetria

„Oh, how ugly” - Einstein

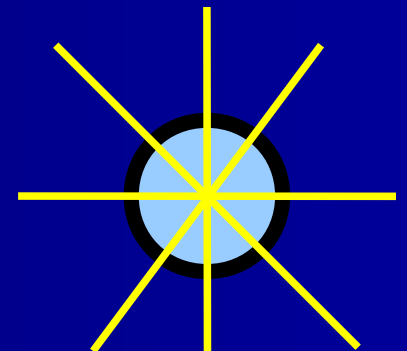
Symetria i niezmienniczość

Figura geometryczna symetryczna względem pewnych operacji, jeśli te operacje nie zmieniają jej:

obrót
wokół
środka



odbicie względem płaszczyzny (linii)



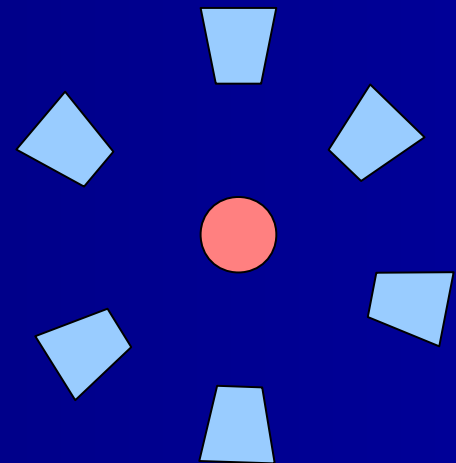
W fizyce – symetria czyli niezmienniczość praw

E. Wigner 1930- czy emisja światła przez atom zależy od kierunku? Doświadczenie: detektory światła ustawiono wokół emitującego atomu, wszystkie dały takie same wyniki

→ symetria obrotowa

Podobnie można badać zależność od przesunięcia w przestrzeni

→ symetria wzg. przesunięcia



Fundamentalne prawa przyrody związane są z symetrią

Emma Noether, 1918

■ Prawa zachowania pędu i energii

Można je powiązać z symetriami względem przesunięć w przestrzeni i w czasie.

zachowanie pędu \rightarrow symetria wzg. przesunięć w przestrzeni

zachowanie energii \rightarrow symetria wzg. przesunięć w czasie

■ Prawo zachowania ładunku elektrycznego

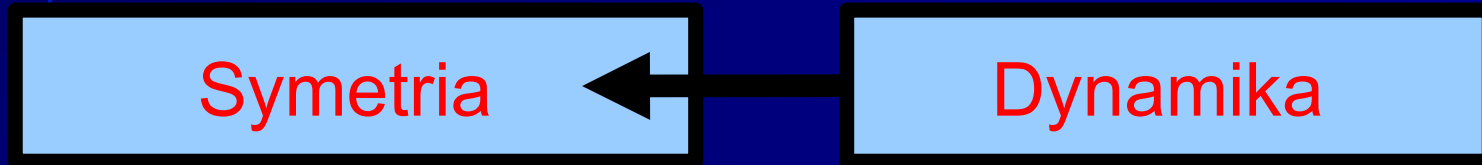
Ale z jaką symetria się wiąże? O tym później..

- Powyższe prawa obowiązują również w mikroświecie, ale tu mamy również inne ładunki i prawa zachowania np. liczby leptonowej L

SYMETRIA

Przed EINSTEINEM

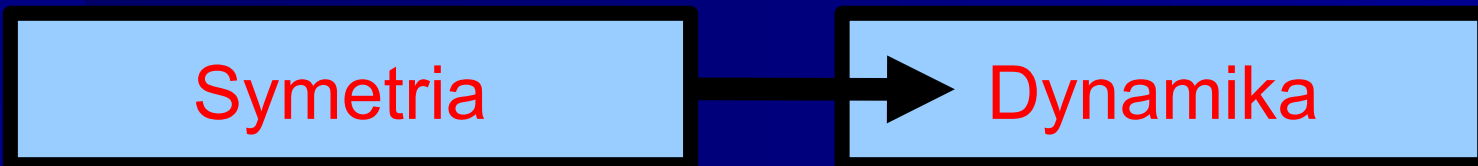
Symetria jako konsekwencja dynamicznych praw przyrody



Po EINSTEINIE

Einstein zauważył relatywistyczną symetrię praw Maxwella i wypromował ją na symetrię czaso-przestrzeni.

→ *Geometryzacja symetrii*



Symetria jest pierwotną własnością natury, która określa **możliwe dynamiczne prawa natury**

SYMETRIA czyli NIEZMIENNICZOŚĆ

GLOBALNA (czyli nie zależy od miejsca i czasu):

Regularności praw ruchu i fizycznych zdarzeń; Przekształcenia symetrii daje różne fizyczne sytuacje ale wszystkie obserwacje są niezmiennie. Tradycyjne symetrie odkryte w przyrodzie są tego typu.

LOKALNA (zależy od miejsca i czasu)

zwana również symetrią **CECHOWANIA**):

Całkowicie inna, dotyczy samych praw natury. Przekształcenie symetrii nie prowadzi do różnej fizycznie sytuacji. Weyl 1918: niezmienniczość pomiarów od skali, wycechowania pręta pomiarowego

LOKALNA SYMETRIA WYZNACZA DYNAMIKĘ

1912-17



grawitacja

1968-73

niezmienniczość cechowania



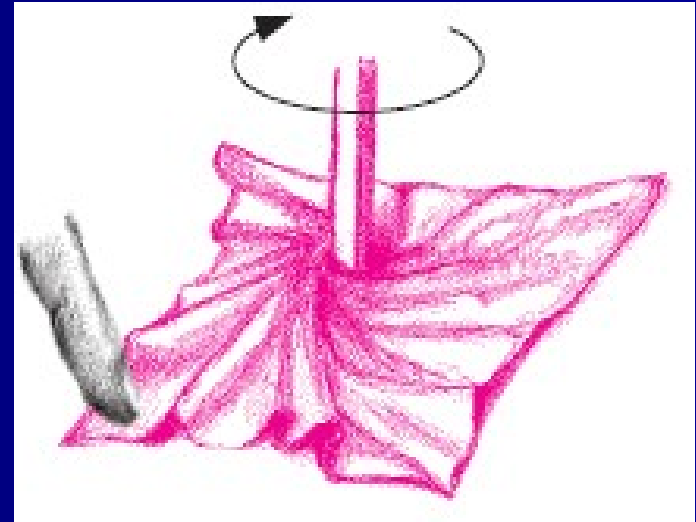
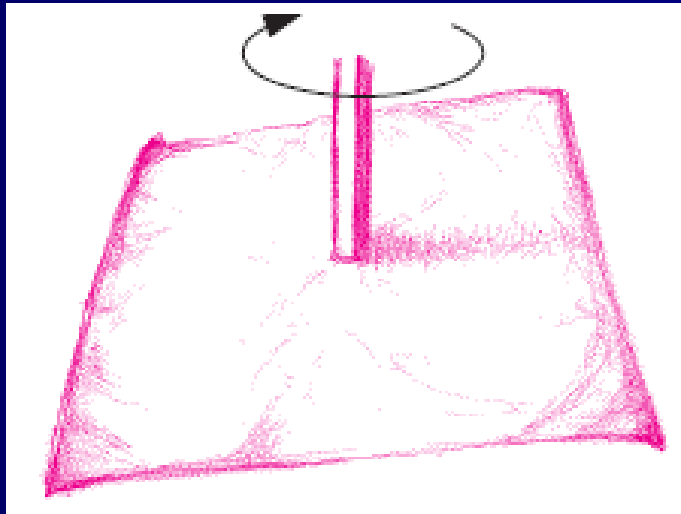
oddz. elektroslabe i silne

Weyl – symetria cechowania

„Niezmienność pręta pomiarowego” (1918)

czyli niezależność układu fizycznego od zmiany skali (wycechowania) przyrządu pomiarowego: zmiana kalendarza, skali temperatury czy położenie zerowego południka nie zmienia odstępów czasu, ciepła potrzebnego do wrzenia cieczy czy długości podróży. Przychody i rozchody, zyski i straty są **globalnie** niezmiennicze gdy zmienimy „miarę” jaką jest pieniądz. Ale jeśli te zmiany miałyby zachodzić lokalnie → chaos.

Globalna i lokalna symetria



Symetria materii-materia symetrii

M. Krawczyk

DELTA 5 (312) 2000

Palec uniemożliwia tu obrót całą serwetą
Fałdy-fale można usunąć
ale przykładając siłę, czyli

trzeba dodać odpowiednie oddziaływanie (i to wszędzie!)
- potrzebne bezmasowe nośniki sił (bozony cechowania)

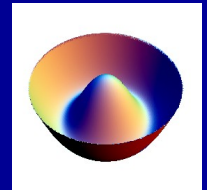
Czy możliwa jest niezmienniczość lokalna dla układu fiz. ? Tak, ale:

- Muszą istnieć dodatkowe obiekty, których zmienność lokalna będzie kompensować lokalne zmiany rozważanego elementu
- Pojawia się oddziaływanie (określonego typu !) i stąd ścisłe związki między formą oddziaływania a istnieniem symetrii lokalnej.
- Przykład- jeśli wartość pieniądza zależy od miejsca (czasu) – zjawiska kompensujące (spekulacja..)...

Symetria – główna idea współczesnej fizyki cząstek elementarnych

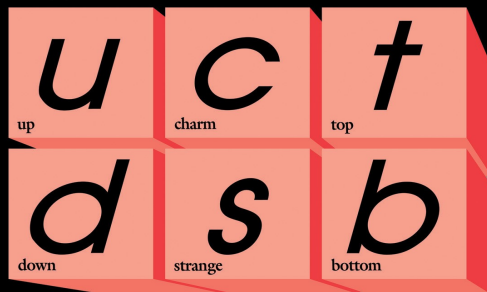
(Nobel'08)

- Klasyfikacja cząstek elementarnych (lata 60' XXw)
 - Opis oddziaływań (od lat 50' XXw)
 - Symetrie ścisłe i przybliżone
 - Symetrie globalne i lokalne
 - Spontaniczne łamanie symetrii (mechanizm generacji mas; przewidywania: bozon(y) Higgsa)
- SEKTOR HIGGSA** – klucz do głębszej teorii

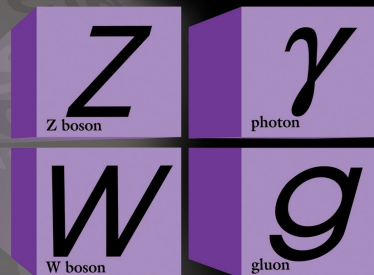


Fundamentalne cząstki Modelu Standardowego

Quarks



Forces



oraz ich antycząstki
np.

$$e^- \rightarrow e^+$$

$$u \rightarrow \bar{u}$$

$$W^+ \rightarrow W^-$$

$$Z^{\nu} \rightarrow Z$$



Leptons

3 rodziny

Opis wszystkich oddziaływań fundamentalnych oparty jest o zasadę cechowania

- Niezmienniczość wzg lokalnej zmiany (fazy) funkcji falowej elektronu wymaga istnienia pola elektromagnetycznego i takiej formy sprzężenia foton-elektron aby skompensować te zmianę – *elektrodynamika kwantowa*.
- To jest zasada cechowania, którą stosujemy do opisu innych sił fundamentalnych. Nośniki pola – bozony cechowania (foton, $W^{+/-}$ i Z , g)

Lokalne zmiany (fazy) funkcji falowej tworzą grupę

- Te zmiany = przekształcenia symetrii tworzą zbiór zwany grupą
np. grupa obrotów, odbić, przesunięć..
Tw. Noether – z każdą symetrią wiążą się prawa zachowania.
- Prawo zachowania ładunku elektrycznego wynika z symetrii oddziaływań e-m wzg. przekształceń unitarnych $U(1)$

Fundamentalne siły i lokalne symetrie (grupy symetrii)

- Elektromagnetyczne: nośnik-foton; grupa $U(1)_{em}$
- Słabe (rozpad beta: $n \rightarrow p e^- \text{ antyneutrino}$
fundamentalne $d \rightarrow u e^- \text{ antyneutrino}$)
E-m i fundamentalne słabe = elektrosłabe (EW)
nośniki: bozony pośredniczące W^+, W^- i Z
oraz foton; grupa $SU(2) \times U(1)$
- Silne (jądrowe pp, pn, nn - między hadronami
fund. jądrowe inaczej **kolorowe** między
kwarkami i gluonami) grupa $SU(3)$

Lokalna symetria a masa bozonów cechowania

Bozony cechowania muszą być bezmasowe, aby kompensować wszędzie efekt zmiany fazy.

Więc masa bozonów cechowania $=0$, gdyż tylko bezmasowe bozony mają nieskończony zasięg.

Masa bozonów pośredniczących W/Z

- Wiemy, że W/Z są bardzo masywne ok. 80-90 GeV

Ale symetria cechowania wymaga: masa zero !

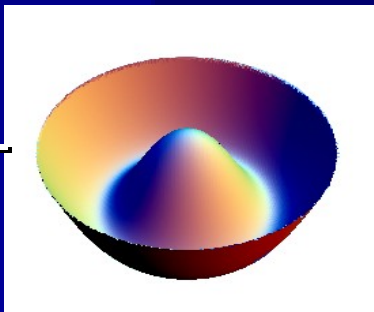
Chcemy mieć ciastko i zjeść ciastko..

W/Z z masą mają trzy polaryzacje, foton tylko dwie !

Dodajemy dublet skalarów (SU(2)) oddziałujący z W i Z.

Energia potencjalna: najniższy stan to próżnia,

ale tu wiele stanów równoważnych na okręgu!



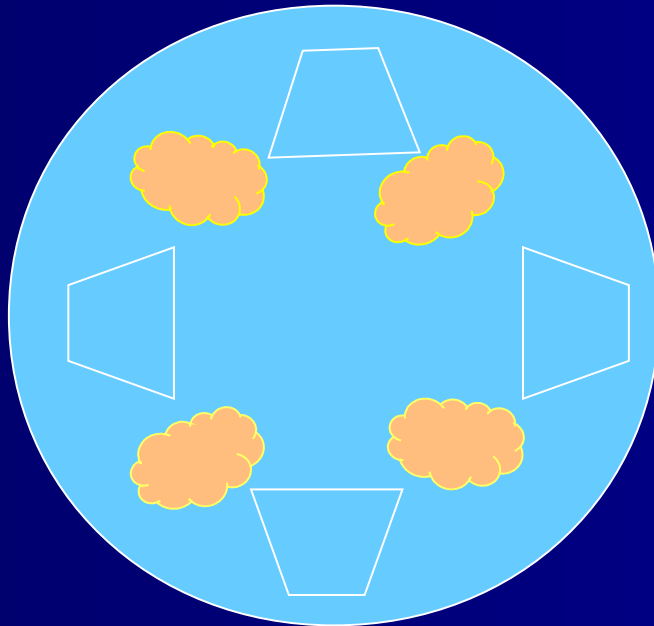
Wybierając jeden z możliwych stanów próżni łamiemy spontanicznie istniejącą symetrię

Promień „rowu” – parametr próżniowy v

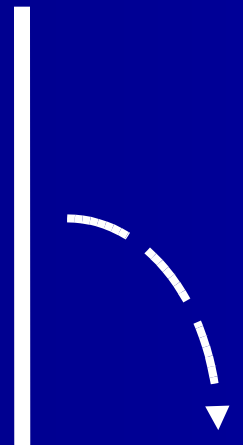
Spontaniczne łamanie symetrii

- Wybierz ciasteczko (lewe-prawe?)–

a inni muszą się
dostosować



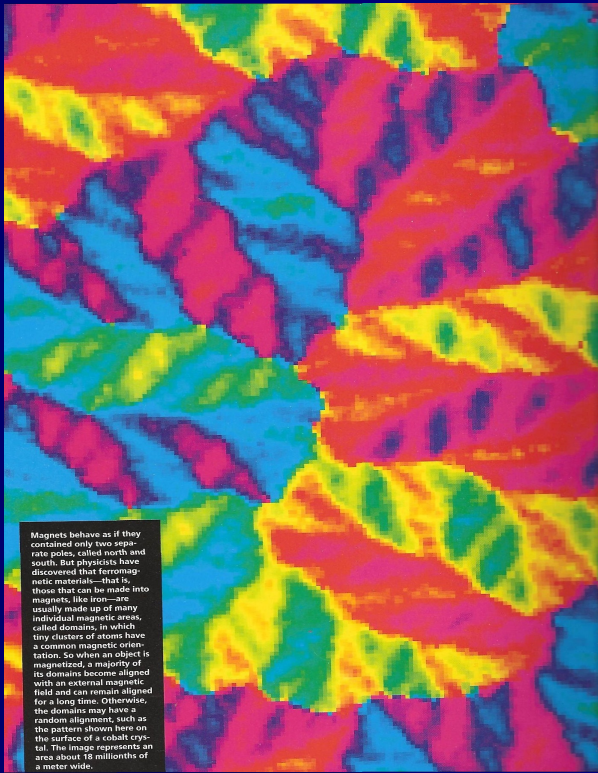
- Pionowy kij – gdzie upadnie?



Spontaniczne łamanie symetrii



Ferromagnetyk ma domeny poniżej temp. Curie, w których grupy atomów mają ten sam kierunek dipoli magnetycznych . Ale różny w różnych domenach...



Magnets behave as if they contained only two separate poles, called north and south. But physicists have discovered that ferromagnetic materials—that is, those that can be made into magnets, like iron—are usually made up of many individual magnetic areas, called domains, in which tiny clusters of atoms have a common magnetic orientation. So when an object is magnetized, a majority of its domains become aligned with an external magnetic field and can remain aligned for a long time. Otherwise, the domains may have a random alignment, such as the pattern shown here on the surface of a cobalt crystal. The image represents an area about 10 millionths of a meter wide.


rozmiar 10^{-6} m

C. Supplee, Physics in the 20-th century

Spontaniczne łamanie symetrii



Struktura
czyli mniejsza symetria
gdy zimno (mała energia)



Struktura znika a
symetria wzrasta
gdy ciepło
(duża energia)

Generacja mas w Modelu Standardowym

- Model Standardowy
masy od 0 do 175 GeV
- Generacja mas W/Z – spontanicznie! ~ 1960
Mechanizm Brouta-Englerta-Higgsa (B-E-H):
masa $\sim g v$ – siła oddz. i parametr próżniowy
- Masy kwarków i leptonów
również w wyniku oddziaływania z dubletem
(ale tu dodatkowe parametry)

Przewidywania B-E-H → bozon Higgsa w MS

- Neutralna, spin 0, cząstka H_{SM}
- Masa nieznana $M = \sqrt{2\lambda v} \sim 100-200 \text{ GeV}$
- Oddziałuje ze sobą: λHHH , $\lambda^2 HHHH$
- Znane sprzężenia do bozonów W i Z i do kwarków i leptonów (oddz. Yukawy)

→ proporcjonalne do ich mas

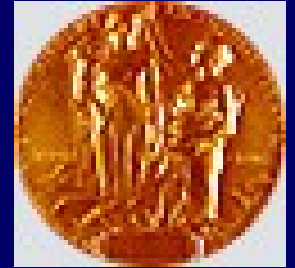
- I dokładnie takie jakie trzeba aby prawdopodobieństwo procesów EW nie większe od 100% - groźba dla en. 300 GeV

więcej o tym na następnych wykładach



Yoichiro Nambu

NOBEL 2008



Za wprowadzenie spontanicznego łamania symetrii do fizyki cząstek elementarnych

Naukowcy, którzy pracowali z Yoichiro Nambu nazywają go wizjonerem, wyprzedzającym swoją epokę. Fizyk Bruno Zumino z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley:

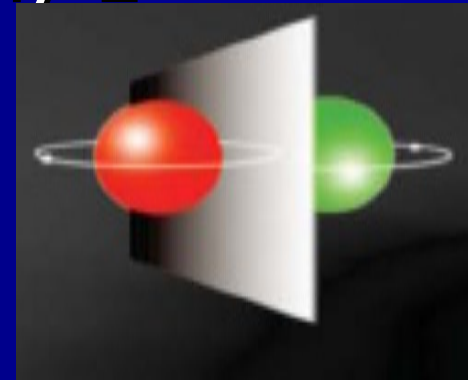
"Wydawało mi się, że jeśli zrozumieć to, nad czym aktualnie rozmyśla Nambu, będę 10 lat do przodu. Więc prowadziłem z nim długie rozmowy. Ale zanim zrozumiałem co powiedział mijają 10 lat".

Spin - przypomnienie

- Własność zwana spinem – własny obrót (kręt) – spinning tennis ball
- Te obroty mogą być tylko pewnego typu -> są skwantowane. Każda cząstka ma określony spin, kierunek osi obrotu może się zmienić, ale nie spin.
- Przyjmując pewną jednostkę spinu - spiny cząstek mogą przyjmować jedynie wartości będące krotnością $\frac{1}{2}$ (0, 1, $\frac{3}{2}$...).
- Fermiony- spin $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}..$ bozony - 0,1,2,..
- Prawe i lewe cząstki o spinie $\frac{1}{2}$

Lewe i prawe stany elektronu

- Elektron w stanie L i elektron w stanie R
- W oddz. e-m ważne tylko że elektron ma ładunek el. a nie czy jest L czy R
- W oddz. elektroślabych – tylko stany L
- Symetria P (odbicia) złamana !
- Symetria C: zmiana ładunku el. na przeciwny.



Symetria kombinowana CP prawie zachowana.

- Prawie robi różnicę - wiąże się z brakiem symetrii materia-anymateria we Wszechświecie



Kobayashi i Maskawa



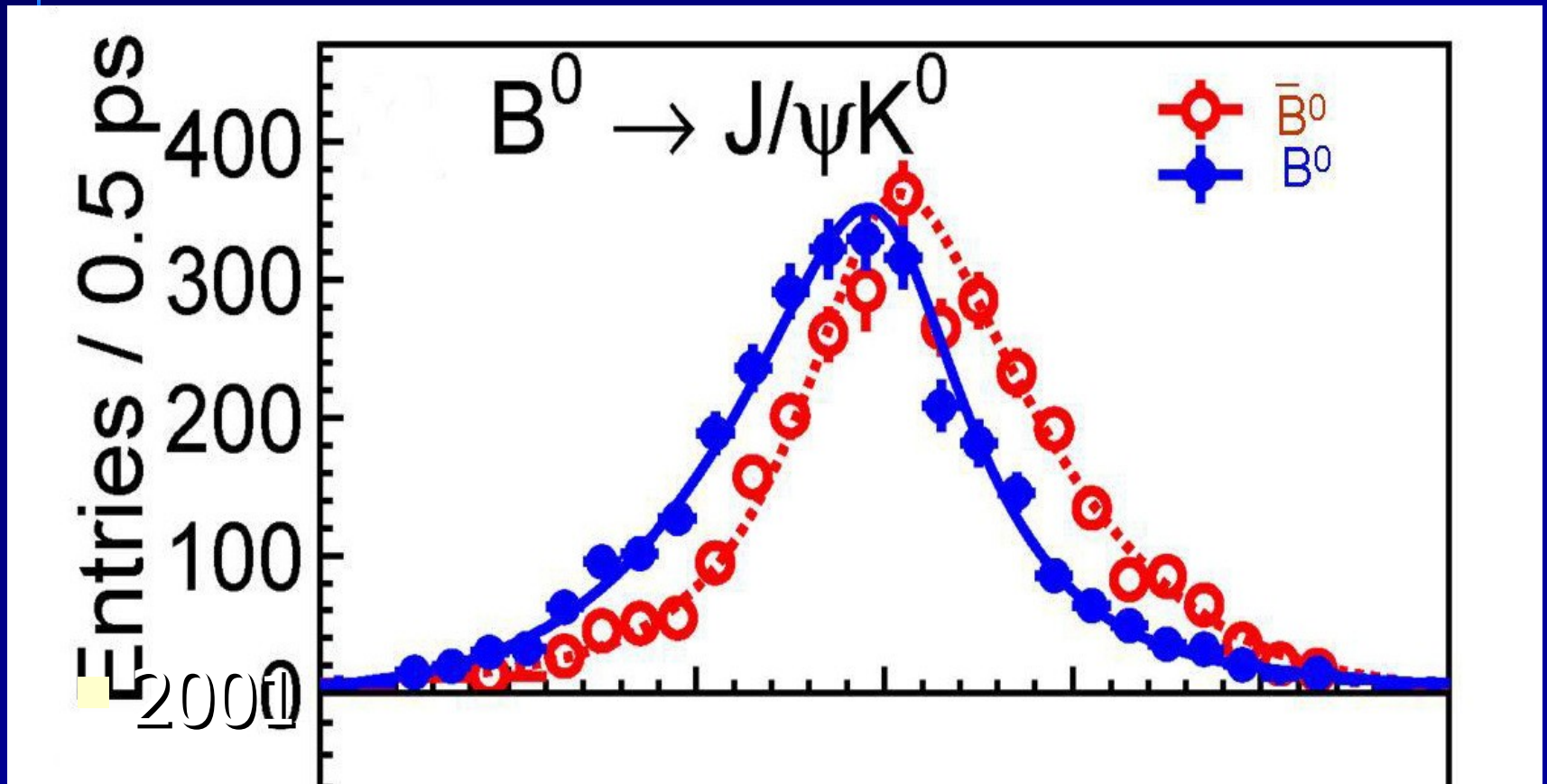
Za wyjaśnienie zjawiska naruszenia symetrii między materią i antymaterią, tzw. łamania symetrii CP, zaobserwowanego w rozpadach mezonów K w eksperymencie Fitcha i Cronina w 1964

Kobayashi i Maskawa wykazali w 1973 r., że efekt łamania CP można wyjaśnić, jeżeli w przyrodzie występują trzy pary kwarków.

A znano tylko trzy kwarki (dwa z pierwszej i kwark dziwny z drugiej generacji). Odkrycie w 1977 r. „pięknego” kwarku b z trzeciej generacji uwiarygodniły mechanizm Kobayashiego-Maskawy. Jednak ostateczne jego potwierdzenie wymagało zaobserwowania nowych przejawów łamania CP, zwłaszcza w procesach z udziałem cząstek z kwarkiem b.



Asymetria w rozpadach B i \bar{B}



MATERIA - ANTYMATERIA

- Unifikacja – równowaga materii i antymaterii

- Sacharow ~1960:

Na początku Wszechświata jest równo, ale jeśli łamana jest symetria C i CP...

może pojawić się mała nadwyżka materii

- W wyniku ekspansji ten mały efekt doprowadził do stanu obecnego – gdy antymaterię wytwarza się tylko w laboratoriach, no i w promieniowaniu kosmicznym.

więcej na następnych wykładach

Asymptotyczna swoboda

- Dla grup symetrii nieabelowych (nieprzemiennych) $SU(2)$, $SU(3)$
nośniki sił „naładowane” i oddziałują ze sobą
- To powoduje, że siła sprzężeń maleje wraz z wzrostem energii oddziaływania (lub maleniem odległości między cząstkami (odwrotnie dla oddz. el.-magn.) - **asymptotyczna swoboda**
- To dzięki temu kwarki mogą oddziaływać słabo i rachunek zaburzeń możliwy dla LHC
- Ale to też prowadzi do **uwięzienia kwarków**-
dlatego w LHC zderzenia protonów a nie kwarków

Model Standardowy w znakomitej zgodności z doświadczeniem

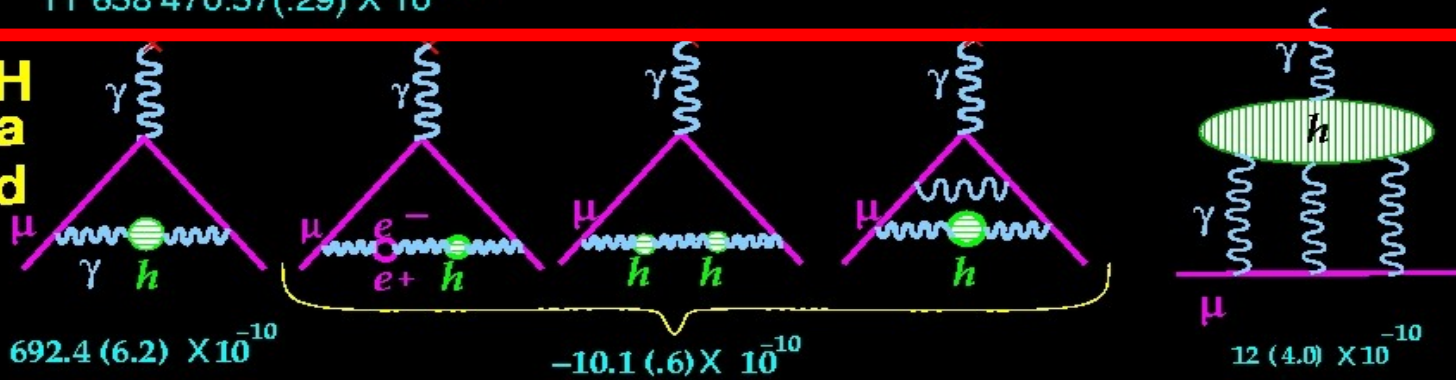
Więcej na następnych wykładach

Przewidywania MS dla momentu magnetycznego dla mionu - poprawki kwantowe

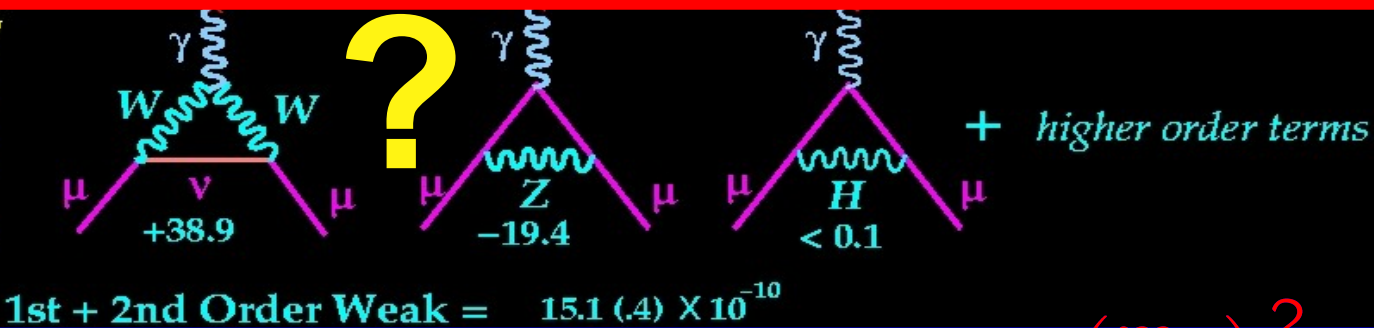
**Q
E
D**



**H
a
d**



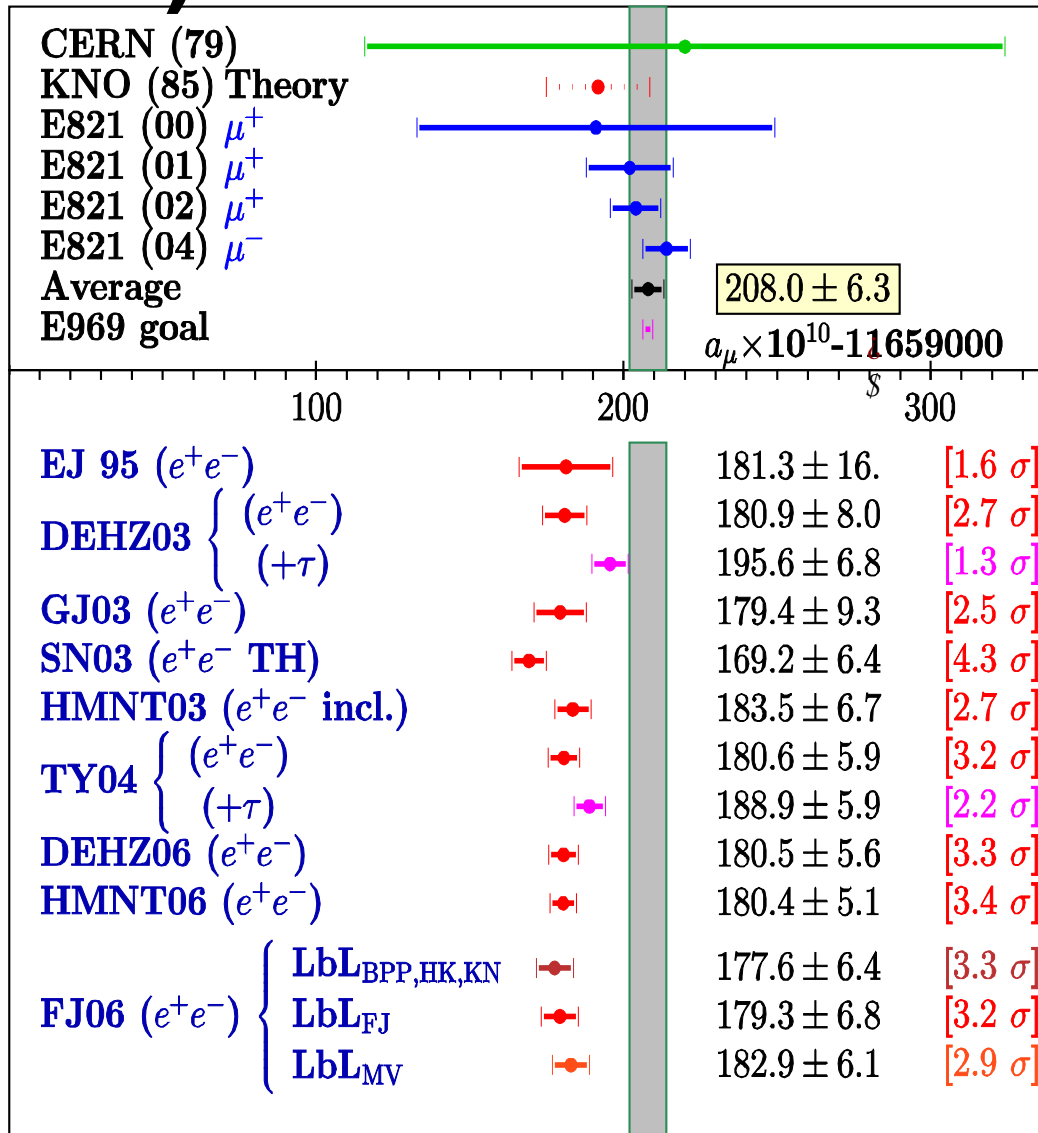
**W
e
a
k**



e vs. μ : relative contribution of heavier things $\left(\frac{m_\mu}{m_e}\right)^2 \simeq 40,000$

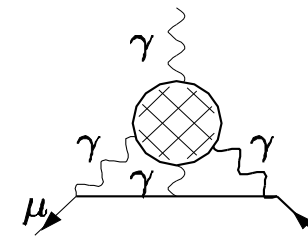
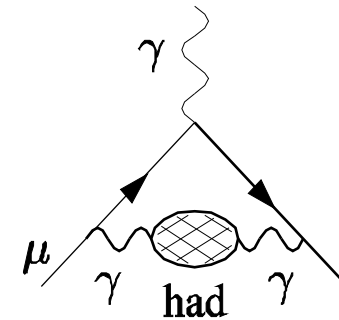
Dane – teoria (MS) = „nowa fizyka”

(Jegerlehner'07)



$$\delta a_\mu = (287 \pm 91) \cdot 10^{-11}$$

3.2 σ



Problemy Modelu Standardowego

- Wiele parametrow (np. masy)
- Dlaczego trzy rodziny
- Niezerowa masa neutrin
- Problem hierarchii- poprawki kwantowe

$$M_H \ll M_{\text{Planka}} (10^{19} \text{ GeV})$$

- Grawitacja?
- Opisuje 4 % wszechświata – brak kandydatów na ciemną materię

Odstępstwa od Modelu? No, i gdzie jest Higgs?