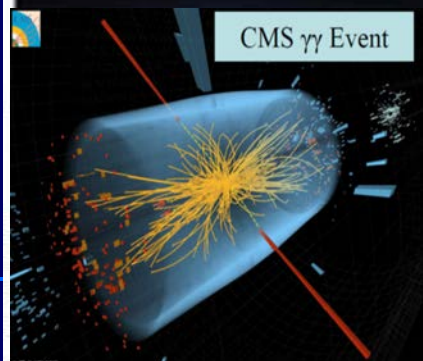


# Wszechświat cząstek elementarnych



## WYKŁAD 9

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

Teoria cząstek elementarnych – rola symetrii

Symetrie – globalne i lokalne

Spontaniczne łamanie symetrii

Model Standardowy:

Generacja mas bozonów W i Z

Bozon Higgsa

Symetria P, C i CP

Symetria materia-antymateria

# 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 mamy 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 prawo wynika z  
własności oddziaływań elektromagnetycznych  
w metalu.

**Opis fundamentalny** →

jak najmniej jak najprostszych praw

Piękno w fizyce = symetria

*„Oh, how ugly” - Einstein o pewnym równaniu*

The beauty of an equation is more important than its correctness, in the sense that if an equation is beautiful, sooner or later it will be demonstrated to be correct.

Paul Dirac



# Herman Weyl

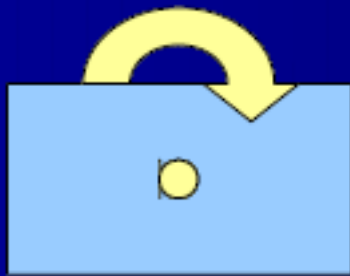
„Symetria – rozumiana czy to w szerokim, czy w wąskim sensie, w zależności jak zdefiniujemy to pojęcie – jest tą ideą, za pomocą której człowiek w ciągu wieków starał się zrozumieć i ustanowić porządek, piękno i doskonałość.”

*H. Weyl, Symetria (Prószyński i S-ka 1997)*

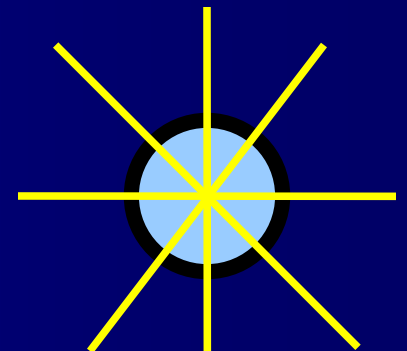
# Symetria i niezmienniczość

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

-obrót  
wokół  
środka



-odbicie względem płaszczyzn (linii)

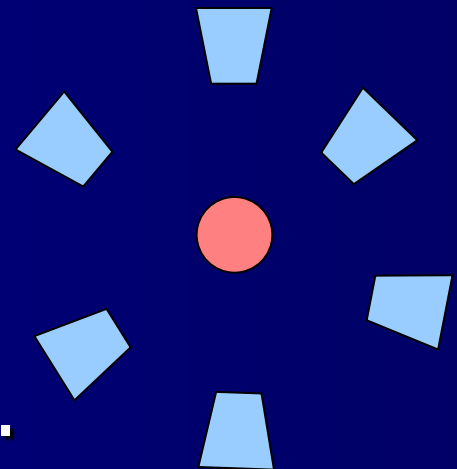


# W fizyce badamy również symetrię (niezmienniczość, niezależność) praw

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

*[można by obracać atomem, a wynik w ustalonym detektorze bez zmian]*

Podobnie można badać (nie)zależność praw od przesunięcia w przestrzeni, itp.



# Fundamentalne prawa przyrody związane są z symetrią

Emma Noether, 1918

## ■ Zachowanie pędu i energii

Można to powiązać z symetrią (niezmienniczością) praw przyrody, *np. równań ruchu*, względem przekształceń układu:

zachowanie pędu → symetria wzg. przesunięć w przestrzeni

zachowanie energii → symetria wzg. przesunięć w czasie

zachowanie momentu pędu → symetria wzg. obrotów

## ■ Zachowanie ładunku elektrycznego

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

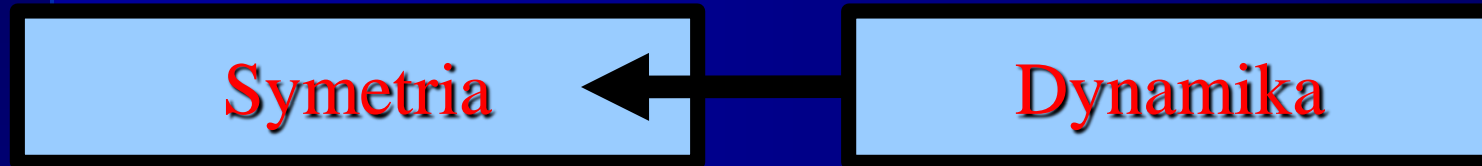
*Powyższe prawa obowiązują również w mikroświecie, gdzie są również inne ładunki i prawa zachowania np. liczby barionowej  $B$*

# SYMETRIA

Przed EINSTEINEM

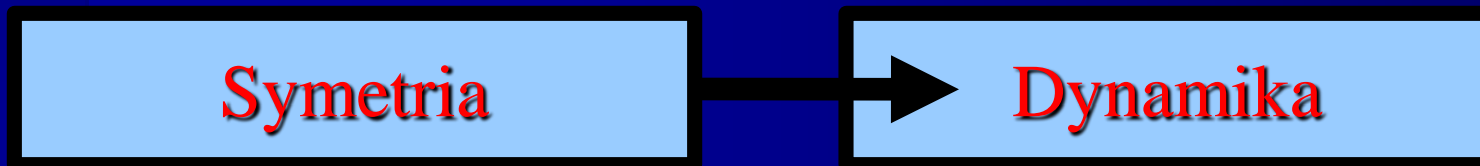
wg D. Grossa

Symetria jako konsekwencja dynamicznych praw przyrody



Po EINSTEINIE

Einstein zauważył relatywistyczną symetrię praw Maxwella (względem zmiany układu odniesienia (tr. Lorentza)) i wypromował ją na symetrię czaso-przestrzeni.



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



# SYMETRIA czyli NIEZMIENNICZOŚĆ

## ■ GLOBALNA (nie zależy od miejsca i czasu):

Regularności równań ruchu i fizycznych zdarzeń; globalne przekształcenia symetrii dają różne fizyczne sytuacje, ale obserwacje są niezmiennie np. w laboratorium na orbicie odległość między pulpitem a oknem stała. Tradycyjne symetrie odkryte w przyrodzie (np. względem obrotów) są tego typu.

## ■ LOKALNA (zależy od miejsca i czasu) :

Całkowicie inna, dotyczy samych praw natury. Przekształcenia symetrii nie prowadzą do różnych fizycznie sytuacji. Oznacza niezależność wyników pomiarów od skali (*wycechowania*) pręta pomiarowego (inna nazwa *symetria cechowania*). Przez lata bez głębszych konsekwencji.

1912-17	symetria czaso-przestrzeni względem lokalnej zmiany współrzędnych	→	grawitacja
1968-73	niezmienniczość cechowania	→	oddziaływania elektroslabe i silne

# Weyl – symetria cechowania(1918)

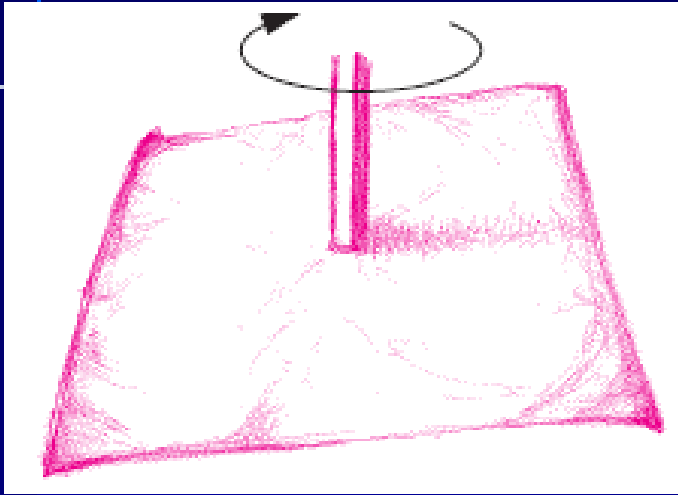
„Niezmienność pręta pomiarowego” - niezależność własności układu fizycznego od zmiany skali (wycechowania) przyrządu pomiarowego.

- **Globalna** zmiana kalendarza, skali temperatury, położenia zerowego południka nie zmienia: odstępu czasu, ciepła potrzebnego do wrzenia cieczy czy długości podróży. Przychody i rozchody, zyski i straty są niezmiennicze, gdy globalnie zmienimy „miarę” jaką jest pieniądz.

- Sytuacja zupełnie inna jeśli te zmiany miałyby zachodzić **lokalnie**.

*Np. gdy zmiany pieniądza lokalne- pojawiają się różne procesy „ wykorzystujące” lokalne różnice.*

# Symetria globalna i lokalna

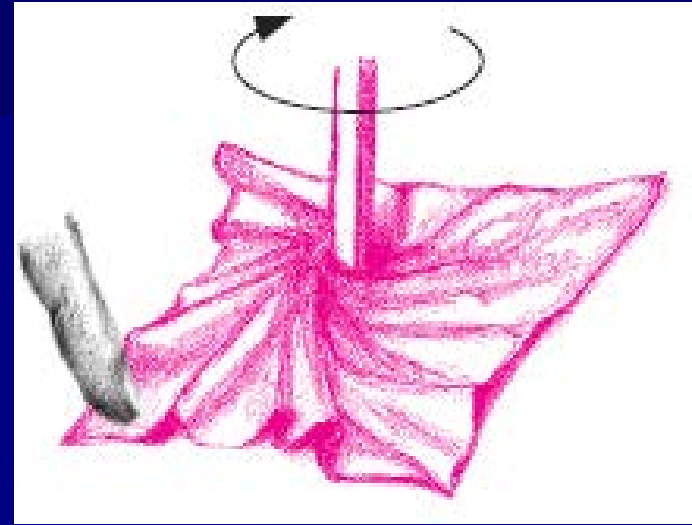


Obrót całą serwetą – nic się nie zmienia czyli symetria.

Symetria materii-materia symetrii

M. Krawczyk

DELTA 5 (312) 2000



Obrót lokalny (palec uniemożliwia obrót całą serwetą) – w punkcie pojawiają się fałdy-fale można je usunąć siłą, przywracając stan poprzedni (tzn. wymuszając symetrię).

Musimy wprowadzić odpowiednie oddziaływanie, i to wszędzie,  
→ potrzebne są bezmasowe nośniki sił – bozony cechowania !

# Niezmienniczość (symetria) lokalna dla układu fizycznego

- Muszą istnieć dodatkowe obiekty, których zmienność lokalna będzie kompensować lokalne zmiany rozważanego elementu układu !

To musi zachodzić w **każdym punkcie** przestrzeni, czyli zasięg musi być nieskończony →

tylko cząstki bezmasowe mają taki zasięg.

- Musi istnieć oddziaływanie (określonego typu !) między obiektami. Stąd ścisłe związki między formą oddziaływania a istnieniem określonej symetrii lokalnej.

# Symetria – główna idea współczesnej fizyki cząstek elementarnych

- Początkowo używana jedynie do klasyfikacji cząstek (-> *multiplety cząstek*)
- Od lat 60' XXw również do opisu oddziaływań

## Typy symetrii:

- Symetrie globalne i lokalne (**uwaga: jeśli układ ma symetrię lokalną to również globalną, ale gdy ma globalną, to niekoniecznie ma symetrię lokalną!**)

Istotnie, bo jeśli układ ma symetrię wzg. przekształceń układu dokonywanych niezależnie w każdym punkcie czaso-przestrzeni, to tym bardziej ma symetrię względem jednakowych przekształceń w każdym punkcie czaso-przestrzeni.

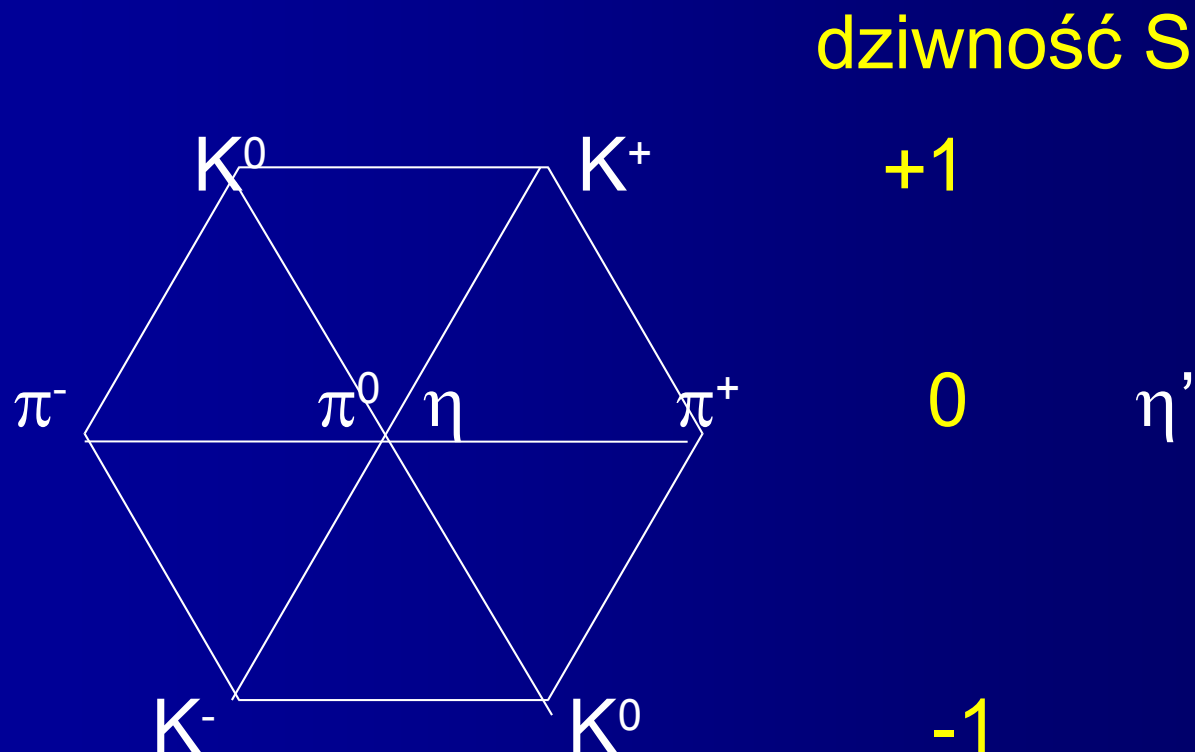
- Symetrie ciągłe i dyskretne (wzg. przekształceń ciągłych np. obrotów o dowolny kąt i dyskretnych - jak odbicia w lustrze)



# Multiplety cząstek elementarnych

-> diagramy kwarkowe...

## Oktet mezonów i skalar



isospin I -1,  $\frac{1}{2}$ , 0,  $\frac{1}{2}$ , 1

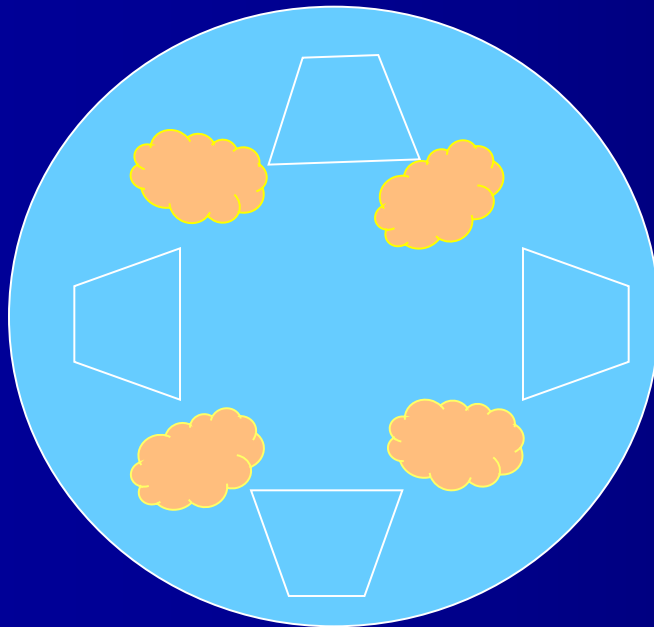
# Symetria i jej łamanie

W fizyce ważne są symetrie ściśle przestrzegane, jak te prowadzące do zachowania energii i pędu oraz ładunku elektrycznego, jak i te przybliżone czy ukryte:

- Symetria ścisła
- Symetria łamana:
  - dynamicznie przez dodatkowe oddziaływanie, które nie respektują symetrii (zwykle dodatkowe oddz. słabsze niż wyjściowe → **symetria przybliżona**)  
*np. symetria izotopowa ( $p \leftrightarrow n$ ) sił jądrowych, łamana przez oddz. e-m*
  - spontanicznie, gdy oddziaływanie respektuje symetrię, ale stany fizyczne nie (**symetria ukryta**).  
*np. siły grawitacyjne nie zależą od kierunku, ale orbita Ziemi nie ma symetrii obrotowej (nie jest kołowa). Powód: asymetryczne warunki początkowe.*

# Spontaniczne łamanie symetrii- przykłady

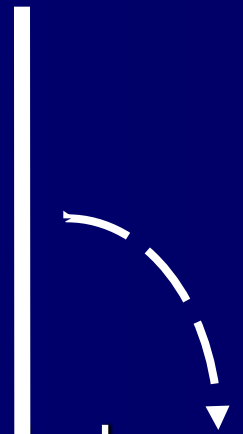
- Goście przy stole: wybierz ciasteczko (lewe-prawe?) :



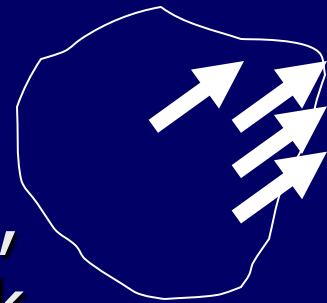
a inni muszą się  
dostosować

- Pionowy kij – gdzie upadnie?

Wszystkie kierunki dobre, ale wybrany tylko jeden

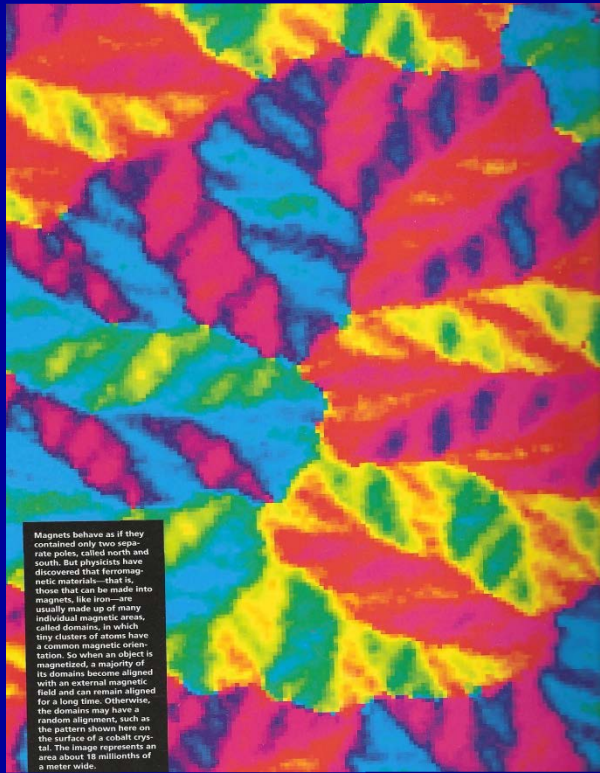


# Spontaniczne łamanie symetrii



Ferromagnetyk ma domeny poniżej temp. Curie, w których grupy atomów mają ten sam kierunek dipoli magnetycznych. (Różny w różnych domenach). A oddziaływanie nie wyróżnia żadnego kierunku, i w wyższych temperaturach domeny znikają.

rozmiar  $10^{-6}$  m



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 18 millionths of a meter wide.

C. Suplee, Physics in the 20-th century

# Spontaniczne łamanie symetrii



Struktura, czyli  
mniejsza symetria gdy  
zimno (mała energia)

Struktura znika  
a symetria wzrasta,  
gdy temperatura  
(energia) wzrasta

z wykładu F. Closa



# Zasada cechowania w teorii cząstek el.

- Niezmienniczość wzg. lokalnej zmiany (fazy) funkcji falowej elektronu wymaga istnienia pola elektromagn. z nośnikiem fotonem i takiej formy sprzężenia foton-elektron aby skompensować tę zmianę (*elektrodynamika kwantowa*).
- To jest **zasada cechowania**, którą stosujemy do opisu również innych sił fundamentalnych. Zmiana fazy funkcji falowych fund. fermionów  $\rightarrow$  istnieją pola cechowania a ich nośniki to bozony cechowania: foton,  $W^{+/-}$ ,  $Z$  (*teoria Glashowa, Salama, Weinberga*) lub gluony (*chromodynamika kwantowa*).

Opis oddziaływań fundamentalnych, również tych wykraczających poza Model Standardowy, opieramy o tę zasadę.

# Grupy przekształceń symetrii

Zmiany fazy funkcji falowej (przekształcenia symetrii) tworzą zbiór zwany **grupą**

*np. grupa obrotów, przesunięć...*

Twierdzenie E. Noether – z każdą niezmienniczością względem globalnych ciągłych przekształceń symetrii wiążą się prawa zachowania.

Np. prawo zachowania ładunku elektrycznego wynika z symetrii oddziaływań e-m względem zmiany fazy (grupy przekształceń unitarnych  $U(1)$ :  $e^{i\theta}$ ,  $\theta \in \mathbb{R}$ )

# Oddz. fundamentalne i lokalne symetrie

(grupy symetrii)

- Elektromagnetyczne: nośnik-foton;

grupa  $U(1)_{em}$  (inaczej  $U(1)_Q$  indeks  $Q$  - zachowany ładunek elektryczny)

- Słabe (fundamentalne np.  $d \rightarrow u e^-$  antyneutrino el.)

e-m i fundamentalne słabe: wspólny opis = elektrosłabe (EW)

nośniki: bozony pośredniczące  $W^+, W^-, Z$  oraz foton  $\gamma$ ;

grupa  $SU(2)_{I_{weak}} \times U(1)_{Y_{weak}}$

$SU(n)$ - unitarne macierze  $n \times n$  z wyznacznikiem 1

(dolne indeksy - zachowane liczby kwantowe)

- Silne (kolorowe między kwarkami i gluonami);

bozony cechowania – gluony;

grupa  $SU(3)_{color}$

# Oddziaływania elektroslabe -

$$SU(2)_{I_{\text{weak}}} \times U(1)_{Y_{\text{weak}}}$$

$I_{\text{weak}}$  – izospin „słaby” (liczba kwantowa podobna do spinu  $1/2$ )

$Y_{\text{weak}}$  – hiperładunek „słaby” (l. kwantowa typu ładunku elektr.)

Wszystkie fund. fermiony w dubletach mają  $I_{\text{weak}} = 1/2$

Związek z ładunkiem elektrycznym  $Q$ :

$$Q = (I_{\text{weak}})_3 + Y_{\text{weak}} / 2$$

$(I_{\text{weak}})_3$  = rzut izospinu (jak rzut spinu  $1/2$ ):  $1/2$  lub  $-1/2$

Fermiony „górne” (kwarki u, c, t; neutrina) :  $(I_{\text{weak}})_3 = + 1/2$

Fermiony „dolne” (kwarki d, s, b; e<sup>-</sup>, μ<sup>-</sup>, τ<sup>-</sup>) :  $(I_{\text{weak}})_3 = - 1/2$

# Model Standardowy

Rola symetrii tak znacząca, że teorie opisujące oddziaływania cząstek fundamentalnych charakteryzuje się podając informacje o grupach symetrii cechowania.

I tak, Model Standardowy to

$$SU(2)_{I_{\text{weak}}} \times U(1)_{Y_{\text{weak}}} \times SU(3)_{\text{color}}$$

A gdzie są oddziaływania elektromagnetyczne  $U(1)_{em}$ ?

Są zawarte w iloczynie  $SU(2)_{I_{\text{weak}}} \times U(1)_{Y_{\text{weak}}}$

wiecej o tym poniżej



# Symetria nieprzemienne → asymptotyczna swoboda

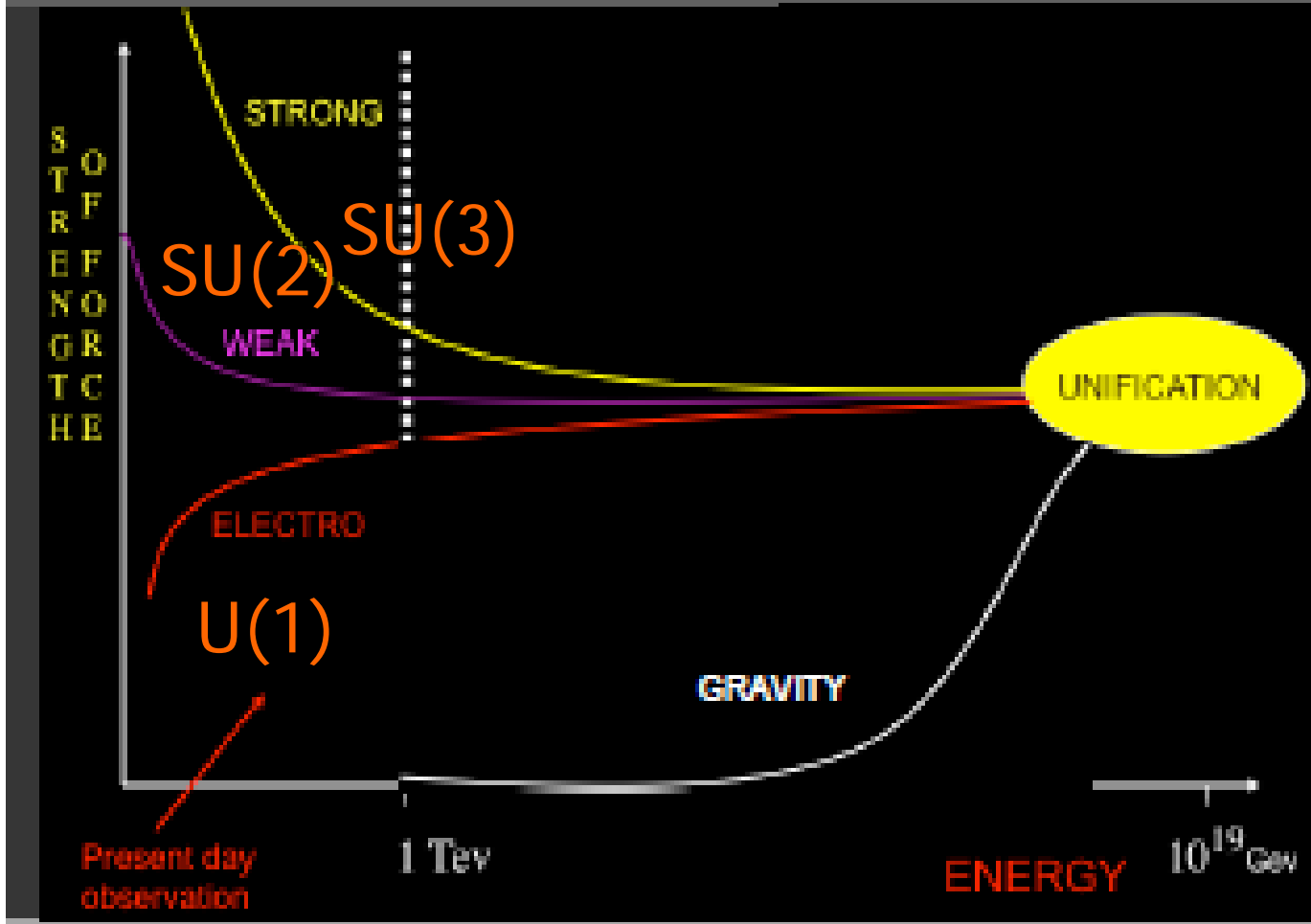
- Dla grup symetrii nieprzemiennej (tzn. takich dla których wynik dwóch kolejnych przekształceń zależy od kolejności ich wykonywania), jak  $SU(2)$  czy  $SU(3)$ , bozony cechowania są „naładowane” i oddziałują ze sobą
- To powoduje, że „siła” sprzężeń maleje wraz z wzrostem energii oddziaływania i maleniem odległości między cząstkami (odwrotnie niż dla oddz. e-m) - **asymptotyczna swoboda** (np. dla kwarków)

Wiemy już, że

- to dzięki temu rachunek zaburzeń możliwy dla oddziaływań kwarków w LHC
- ale to też prowadzi do **uwięzienia kwarków**- dlatego w LHC zderzenia protonów, a nie kwarków

# D. Gross, Photon 2005

## UNIFICATION OF ALL FORCES



# Lokalna symetria a masa bozonów cechowania

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

Tylko bezmasowe bozony mają nieskończony zasięg, ale przecież wiemy, że W/Z są bardzo masywne (ok. 80-90 GeV)

*Chcemy mieć ciastko (symetrię cechowania)  
i zjeść ciastko (i masywne bozony cechowania).  
Musimy to zrobić jakimś sposobem ...*

# Masa bozonów pośredniczących W/Z

- Masywne bozony o spinie 1 mają trzy stany spinowe (polaryzacyjne)  $-1, 0, +1$ , bezmasowe bozony o spinie 1 tylko dwa ( $-1$  oraz  $+1$  – tak jak foton) !
- Musimy coś dodać do zestawu fundamentalnych obiektów w MS, gdyż brakuje nam „tych stanów” (stopni swobody) dla zbudowania masywnych bozonów W i Z
- W Modelu Standardowym dodajemy dublet pól skalarnych (spin 0)

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^0 \end{pmatrix}$$

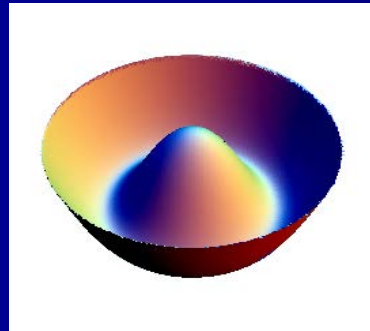
oddziałujący z W/Z zgodnie z symetrią cechowania

# Łamanie symetrii w MS:

$$SU(2)_{I \text{ weak}} \times U(1)_{Y \text{ weak}} \rightarrow U(1)_{em}$$

Energia potencjalna układu: najniższy stan to próżnia.

Potencjał dla  $\Phi$  ma kształt meksykańskiego kapelusza:  
wiele równoważnych stanów próżni na okręgu - symetria!



promień „okręgu”  
– parametr  
próżniowy  $v$

Wybierając jeden z możliwych stanów próżni – łamiemy spontanicznie symetrię  $SU(2)_{I \text{ weak}} \times U(1)_{Y \text{ weak}}$

Ale nadal pozostaje symetria  $U(1)_{em}$  !

# Generacja mas w Modelu Standardowym

- Mechanizm Brouta-Englerta-Higgsa (BEH) ~1960

*generacja mas bozonów cechowania przez spontaniczne łamanie symetrii cechowania*

*nagroda Nobla 2013*

- W Modelu Standardowym

→ generacja mas W/Z spontanicznie

$$\text{masa W/Z} \sim g v$$

g- „siła” oddz. słabego i v- parametr próżniowy

→ masy kwarków i leptonów również w wyniku oddziaływania z dubletem skalarów  
*(choć tu dodatkowe parametry)*



# Cząstka Higgsa

- Pole  $\varphi^0$  można przedstawić jako sumę

$$\varphi^0 = v + H$$

gdzie  $H$  – reprezentuje cząstkę fizyczną o spinie 0  
→ **bozon Higgsa**.

- Pozostałe pola z dubletu  $\Phi$  zostały zużyte na stworzenie stanów polaryzacyjnych dla  $W^+, W^-, Z$   
(pola  $\varphi^0$  i  $\varphi^+$  zespolone → **4 stopnie swobody**)

# Przewidywania B-E-H $\rightarrow$ bozon Higgsa w Modelu Standardowym

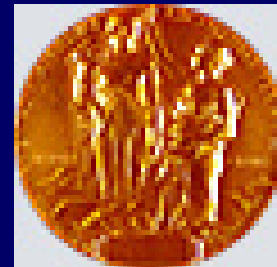
- Neutralna, spin 0, cząstka Higgsa H
- Oddziałuje ze sobą:  $\lambda$  HHH,  $\lambda^2$  HHHH ( $\lambda$  – „siła”)
- Masa  $M = \sqrt{2\lambda}v$  ? (brak przewidywań); *ok 125 GeV (LHC 2012)*
- Znana „siła” sprzężenia do bozonów W i Z oraz do kwarków i leptonów (oddz. Yukawy)
  - $\rightarrow$  proporcjonalne do ich mas
- I dokładnie takie jakie trzeba, aby prawdopodobieństwo procesów EW nie było większe od 100% - groźba dla energii  $\sim 300$  GeV !

*więcej o tym na następnych wykładach*



# Yoichiro Nambu

## NOBEL 2008



### Za wprowadzenie spontanicznego łamania symetrii do fizyki cząstek elementarnych

Nambu przeniósł ideę spontanicznego łamania symetrii, znaną w fizyce ciała stałego, 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, mijało 10 lat".*

# Oddziaływnie słabe czułe na stany spinowe cząstek

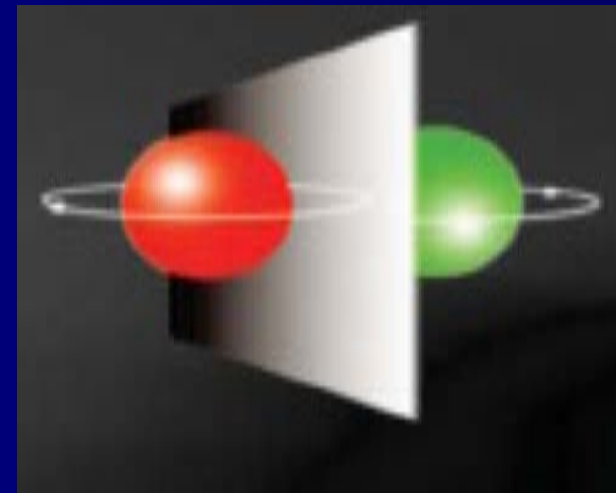
Wiemy, że dla cząstki o spinie  $\frac{1}{2}$  możliwe rzuty na określoną oś, np. wyznaczoną przez pęd cząstki, wynoszą  $+\frac{1}{2}$  i  $-\frac{1}{2} \rightarrow$

prawe R (right) i lewe L (left) cząstki

Oddziaływania słabe działa tylko między lewymi stanami cząstek ! *Yang-Lee 1956*

*Wu 1957*

A to oznacza, że oddziaływania te nie respektują symetrii względem odbicia (symetria P -parzystości), które oznacza zamianę  $L \leftrightarrow R$



# Symetria P, C i CP w oddz. słabych

Oddziaływania słabe mają najmniej symetrii

- **Symetria P** (odbicia): zamiany  $L \leftrightarrow R$  złamana!
- **Symetria C** (sprzężenia ładunkowego): zamiana cząstki na anyczastkę (ładunku el. na przeciwny) złamana! (C zmienia neutrino L na antyneutrino L, a w przyrodzie nie ma takiego stanu - anyneutrino tylko prawe R)
- **Symetria kombinowana CP** (złożenie operacji odbicia i sprzężenia ład.) neutrino lewe przeprowadza na antyneutrino prawe - OK. *Landau 1957*
- Ta symetria jest prawie ( $10^{-4}$ ) zachowana. **Prawie robi różnicę** → brak symetrii materia-anymateria we Wszechświecie



# Kobayashi i Maskawa



Nobel' 2008

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

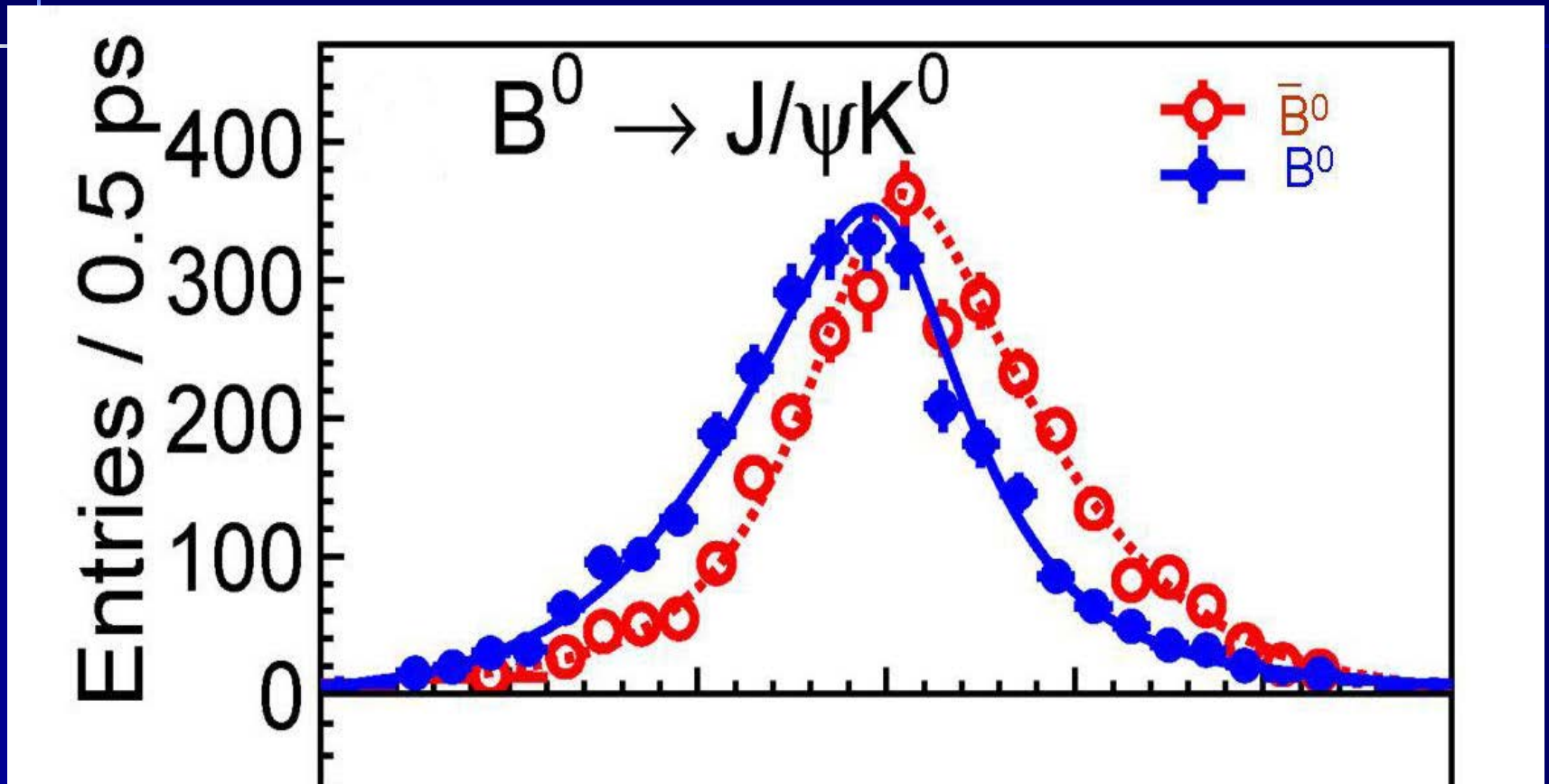
**Kobayashi i Maskawa wykazali w 1973 r., że efekt łamania CP można wyjaśnić, jeżeli w przyrodzie występują trzy pary kwarków.**

**A znano wtedy tylko trzy kwarki (dwa z pierwszej u i d i kwark dziwny s 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 (np. różnic (asymetrii) w rozpadach cząstki i antycząstki)**





# Asymetria w rozpadach mezonów B ( $d \bar{b}$ ) i $\bar{B}$ ( $\bar{d} b$ )



Odkrycia:

2001r asymetria dla mezonów B (SLAC USA, KEK Japonia)

2011r dla mezonów D (CERN, Europa)

# MATERIA - ANTYMATERIA

- Skąd różnica występowania materii i antymaterii we Wszechświecie?
- Postulat Sacharowa ~1960:  
Na początku Wszechświata jest tyle materii co antymaterii, ale jeśli łamane są symetrie C i CP.. może pojawić się mała nadwyżka materii.
- W wyniku ekspansji ten mały efekt doprowadził do stanu obecnego – gdy antymateria wytwarzana jest tylko w laboratoriach, i w promieniowaniu kosmicznym.

*więcej na następnych wykładach*

# Model Standardowy w znakomitej zgodności z doświadczeniem

*Więcej na następnych wykładach*

- Podaj dwa przykłady przykształceń ciągłej.
- Czy symetria globalna wynika z symetrii lokalnej, czy odwrotnie?
- Czy symetria lokalna to to samo co symetria cechowania?
- Czy symetria wyznacza dynamikę?
- Czego dotyczy twierdzenie Noether?
- Czy zasada cechowania stosuje się jedynie do Modelu Standardowego?
- Podaj dwa przykłady spontanicznego łamania symetrii z życia codziennego?
- Ile stanów spinowych ma masywny bozon Z?
- Czy gra w ruletkę to przykład spontanicznego łamania symetrii ?
- Czy w oddziaływaniu słabym uczestniczy prawy elektron?
- Dlaczego trudno było znaleźć cząstkę Higgsa
- Podaj spin cząstki Higgsa.
- Czy oddziaływanie cząstki Higgsa jest "silniejsze" czy "słabsze" dla cząstek masywniejszych?
- Czy cząstki Higgsa oddziałują ze sobą?
- Za co Y. Nambu dostał Nagrodę Nobla?
- Czego dotyczy postulat Sacharowa?