

Czego brakuje w Modelu Standardowym – konceptcje i idee

What is missing in the Standard Model – concepts and ideas

Marek Pawłowski

Instytut Problemów Jądrowych

im. A. Sołtana w Świerku



Plan

- Równania Maxwella – droga do QED
- Symetria cechowania
- Kwantowa Teoria Pola
- Diagramy Feynmana
- QCD
- Oddziaływania słabe
- Mechanizm Higgsa
- Supersymetria
- Inne propozycje



Równania Maxwella

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Równania Maxwella to równania lokalne. Ale różniczkowe!

Dlatego watro ich używać!

„Pierwsza połowa” opisu oddziaływania ładunków elektrycznych.

Opis w dwóch krokach:

1. Ładunki wytwarzają pole
2. Pole oddziałuje na ładunki

Krok pierwszy: Równania Maxwella.

Krok drugi: siła Lorentza

$$\vec{F} = q \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}$$

„Druga połowa” jest lokalna – z samej konstrukcji.

Nie zakładaliśmy, że lokalna będzie także „pierwsza połowa”. Można by się spodziewać, że nie będzie. A jednak ...

Konsekwencje:

1. Zaburzenia pól powodowane przez zaburzenia źródeł rozchodzą się jak fale.

Fale elektromagnetyczne zostały odkryte przez Hertza w 1888 r.

2. Rozchodzą się z prędkością światła

→ teoria elektromagnetyzmu wchłania optykę.

3. Mają symetrię Lorentza

→ Szczególna Teoria Względności.

Światło „jest realne”. Raz wyemitowane, „żyje” własnym życiem.

Możliwość utożsamienia światła z falami elektromagnetycznymi oznacza, że rozbić oddziaływań elektromagnetycznych na dwa etapy:

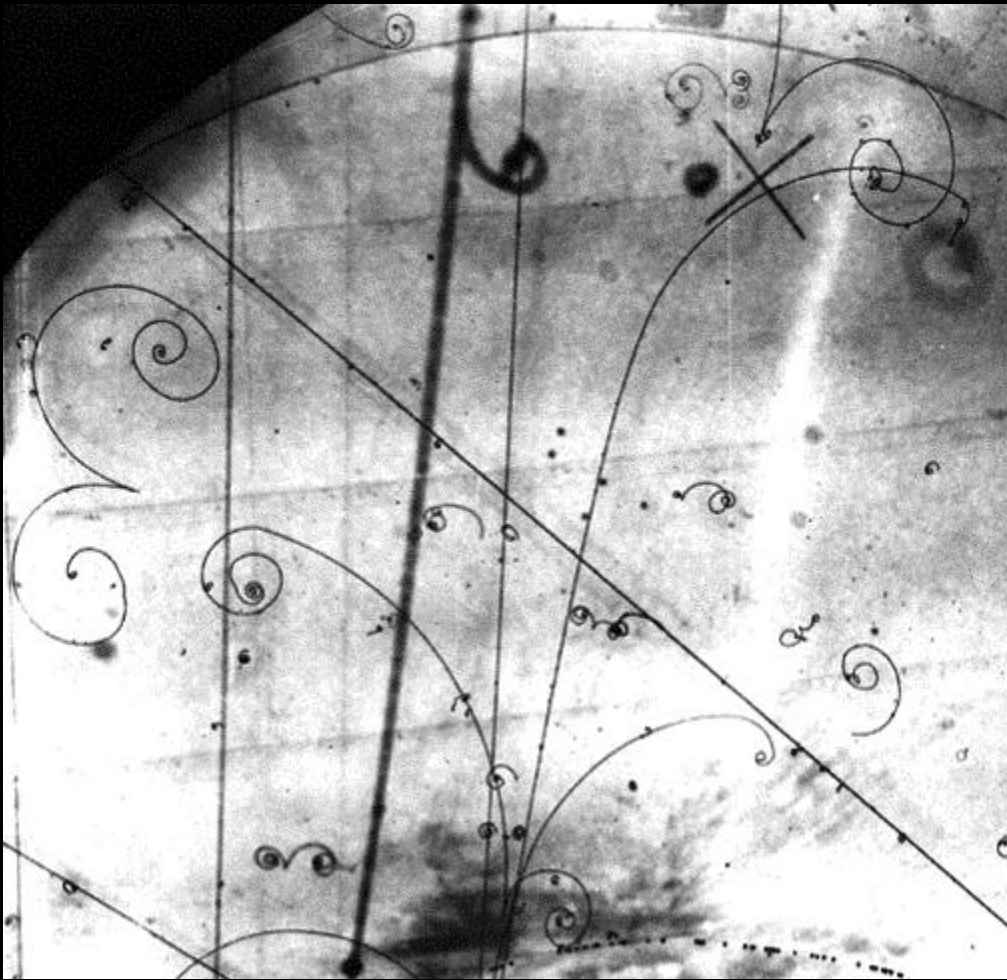
wytwarzanie pól przez źródła + oddziaływanie pól ze źródłami jest czymś więcej niż konstrukcją myślową ułatwiająca rachunki.

Pola przenoszące oddziaływania trzeba traktować jako byty realne.

Dodatkowe argumenty:

Cząstkowa natura światła: ciało doskonale czarne i efekt fotoelektryczny zewnętrzny





Niezbędna jest Kwantowa Teoria Pola!

Rodzące się cząstki – pary elektron-pozyton.

Tego zjawiska nie wyjaśnia teoria klasyczna – teoria punktowych „wiecznych” ładunków poruszających się po trajektoriach $r(t)$ zdeterminowanych przez siły pochodzące od pól.

Tego zjawiska nie wyjaśnia mechanika kwantowa – teoria funkcji $\psi(x)$ opisujących szanse znalezienia elektronu. Elektronu, o którym zakładamy z góry, że gdzieś go trzeba znaleźć (normalizacja f. falowej).

Potencjały i symetria cechowania

$$\vec{\nabla} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Równania Maxwella można zapisać przy pomocy potencjałów: wektorowego A i skalarnego φ .

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

Dwa środkowe równania są tożsamościami.

Jest cała rodzina potencjałów A i φ , które prowadzą do tych samych pól E i B . Jeśli zmienimy A i φ przy pomocy dowolnej funkcji $\lambda(x,t)$ to E i B nie odczują tej zamiany! **To się nazywa symetria cechowania!**

$$\vec{A}'(r,t) = \vec{A}(r,t) + \vec{\nabla} \lambda(r,t)$$

$$\varphi'(r,t) = \varphi(r,t) + \frac{\partial \lambda(r,t)}{\partial t}$$

W klasycznej elektrodynamice potencjały są zbędne, a symetria cechowania jest jedynie symetrią języka opisu. Symetria cechowania nie działa na klasyczne źródła.

Opis przy użyciu potencjałów jest potrzebny by zbudować teorię kwantową – przynajmniej taką, która jest lokalna.

W teorii kwantowej pola cząstek naładowanych są zespolone. Transformacja cechowania zmienia fazę zespolonej funkcji falowej mnożąc ją przez czynnik $\exp(iq\lambda(x,t))$. Mnożenie przez czynnik fazowy, to obracanie w płaszczyźnie zespolonej. Symetria cechowania elektrodynamiki jest grupą transformacji symetrii polegających na takich obrotach. Matematycznie jest to grupa $U(1)$.

- Nie chodzi o obroty w przestrzeni lub w czasoprzestrzeni!
- Jest to symetria lokalna - $\lambda(x,t)$.
- Poprzez twierdzenie Noether implikuje zasadę zachowania ładunku elektrycznego.

Cechowania – bo możemy narzucić na pola jakiś dodatkowy warunek, nadać im pewną szczególną cechę, dzięki której np. rachunki staną się prostsze. Np. $\varphi = 0$



Kwantowa teoria pola:

Elektrodynamika Kwantowa → Model Standardowy

Stan oddziałującego pola kwantowego jest superpozycją nieskończonej liczby stanów (MK) o ustalonej liczbie cząstek.

Możemy zadać pytanie o to jakie są szanse, że stan początkowy, w którym był jeden foton przeszedł w stan końcowy, w którym znajdziemy 5 elektronów, 5 pozytonów i 10 fotonów.

Cząstki materii (elektrony ...) i cząstki przenoszące oddziaływania (fotony ...) traktowane są bardzo podobnie.

Dirac 1927 – spontaniczna emisja fotonu z atomu, operatory kreacji i anihilacji ...

Policzalna!

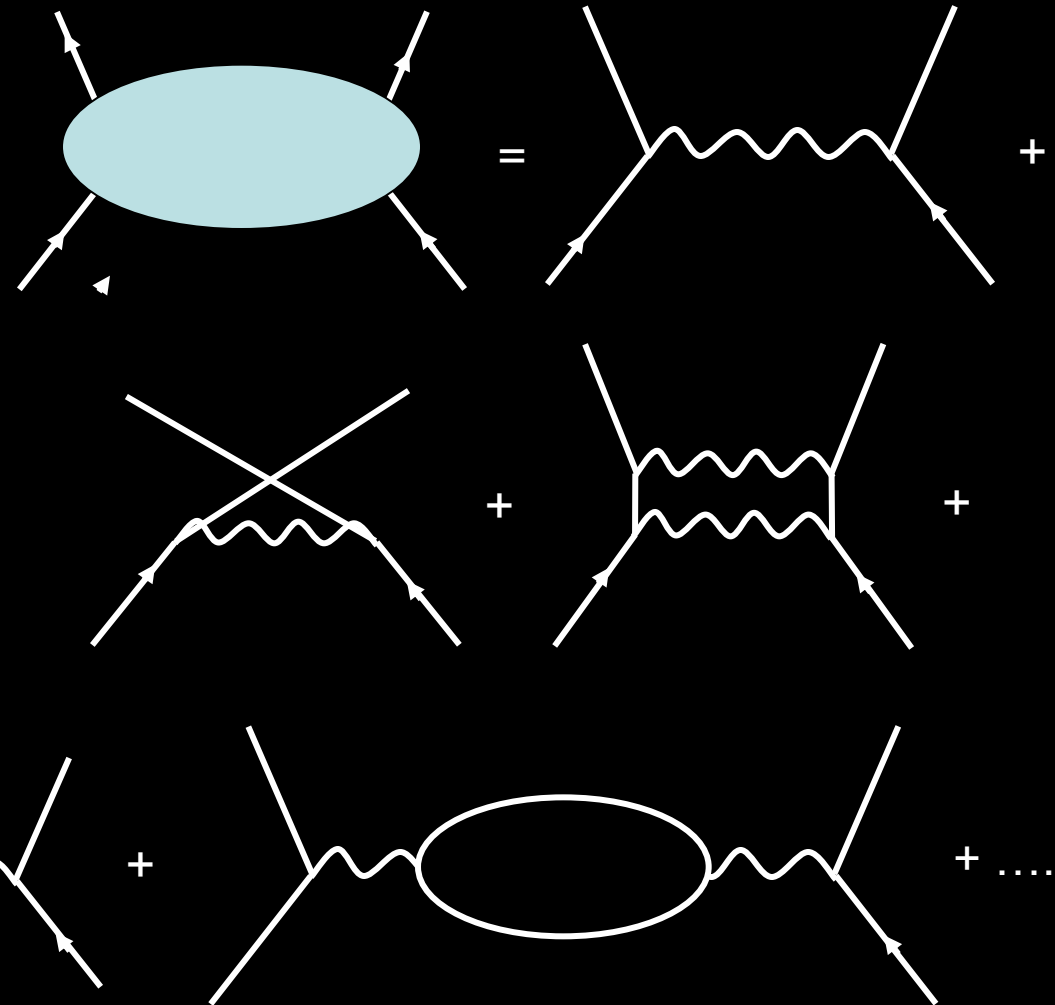
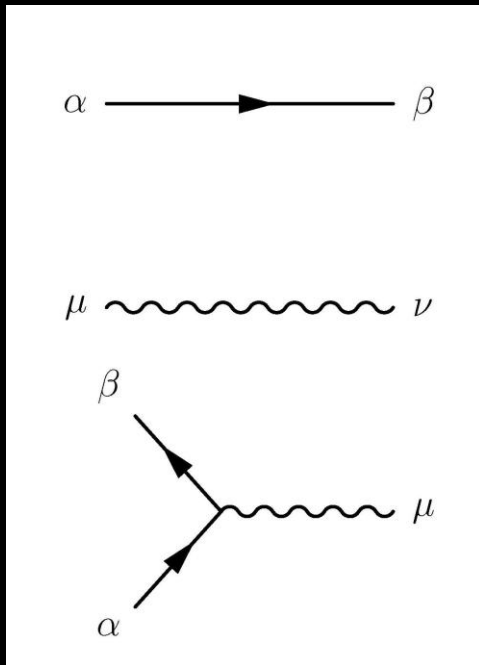
Anomalny moment magnetyczny elektronu, przesunięcie Lamba

Rozkwit pod koniec lat czterdziestych dzięki ...



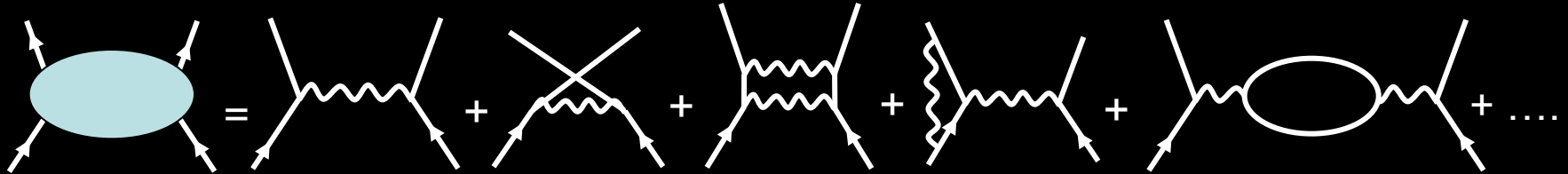
Diagramy Feynmana

Np. rozpraszanie elektronów:



I jeszcze
„zerowy”!

Każdy graf to wielokrotna całka – tym bardziej krotna, im więcej linii wewnętrznych.

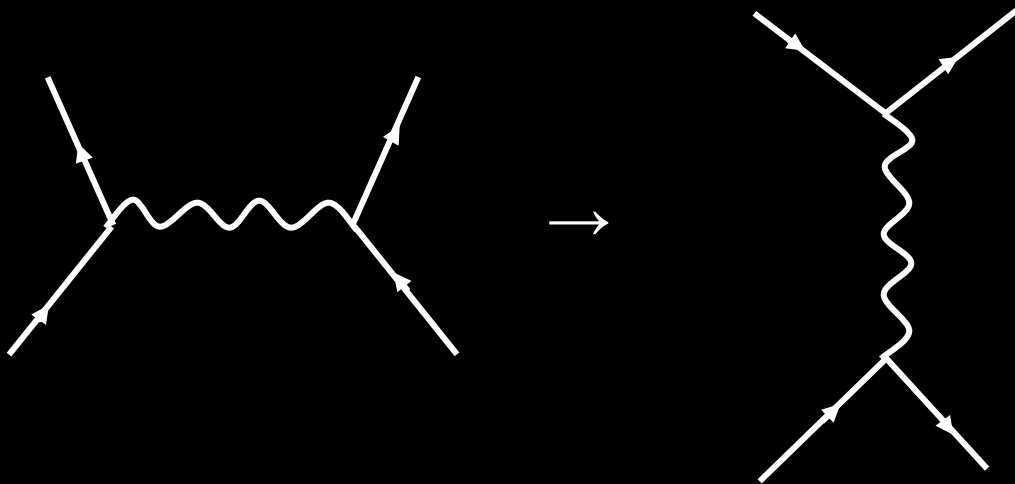


Na domiar złego te całki zazwyczaj są rozbieżne!

Czy to może prowadzić do sensownych wyników ?????!!!!

Może!

- Każdy wierzchołek, to mnożenie przez bezwymiarową stałą sprzężenia będącą miarą siły oddziaływania. W elektrodynamice $\alpha = e^2 / 2\hbar\epsilon = 1/137$. Im „wyższy graf, tym większa potęga α . To rachunek zaburzeń.
- Renormalizacja usuwa nieskończoności, poprzez przedefiniowanie stałych teorii. Nie każda teoria jest renormalizowalna, czyli taka, że skończona liczba „przedefiniowań” czyni ją skończoną. Elektrodynamika kwantowa jest! Nie ma pewności, czy teorii, których nie da się zrenormalizować poprzez „znane sposoby” nie będzie można w inny sposób uczynić skończonymi.



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

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

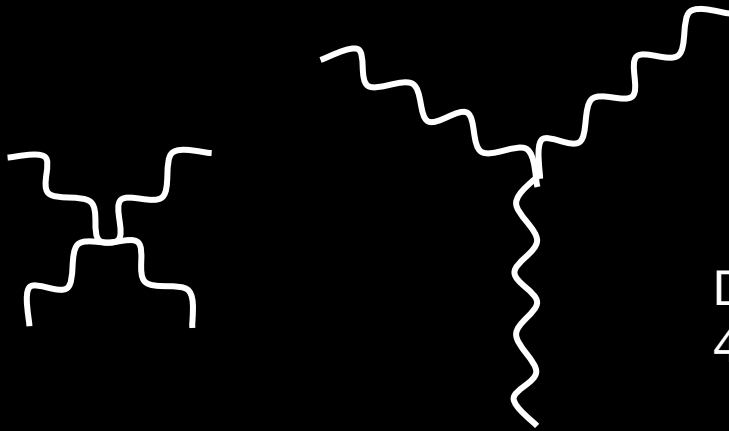
Diagramy można obracać.

Pozyton to elektron „biegnący do tyłu”.

A co z zasadą zachowania pędu? Elektron i pozyton nie mogą anihilować do jednego fotonu!

To prawda, ale dotyczy to stanów końcowych. W stanach pośrednich (wirtualnych) pęd fotonu może być np. zerowy. Podobnie inne wirtualne cząstki nie muszą spełniać związku $m^2 = E^2 - p^2$. Mówimy, że nie są na powłóce masy.

QCD



Dodatkowe wierzchołki sprzęgające 3 i 4 gluony – bo mają ładunek kolorowy.

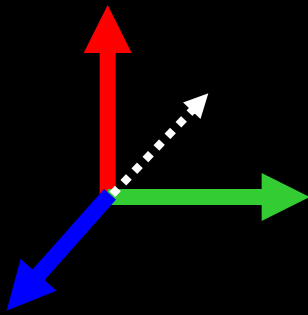
Ta teoria także jest renormalizowalna.

Stosunkowo duże stała sprzężenia ok. $1/10$ (w przeciwieństwie do $1/137$).

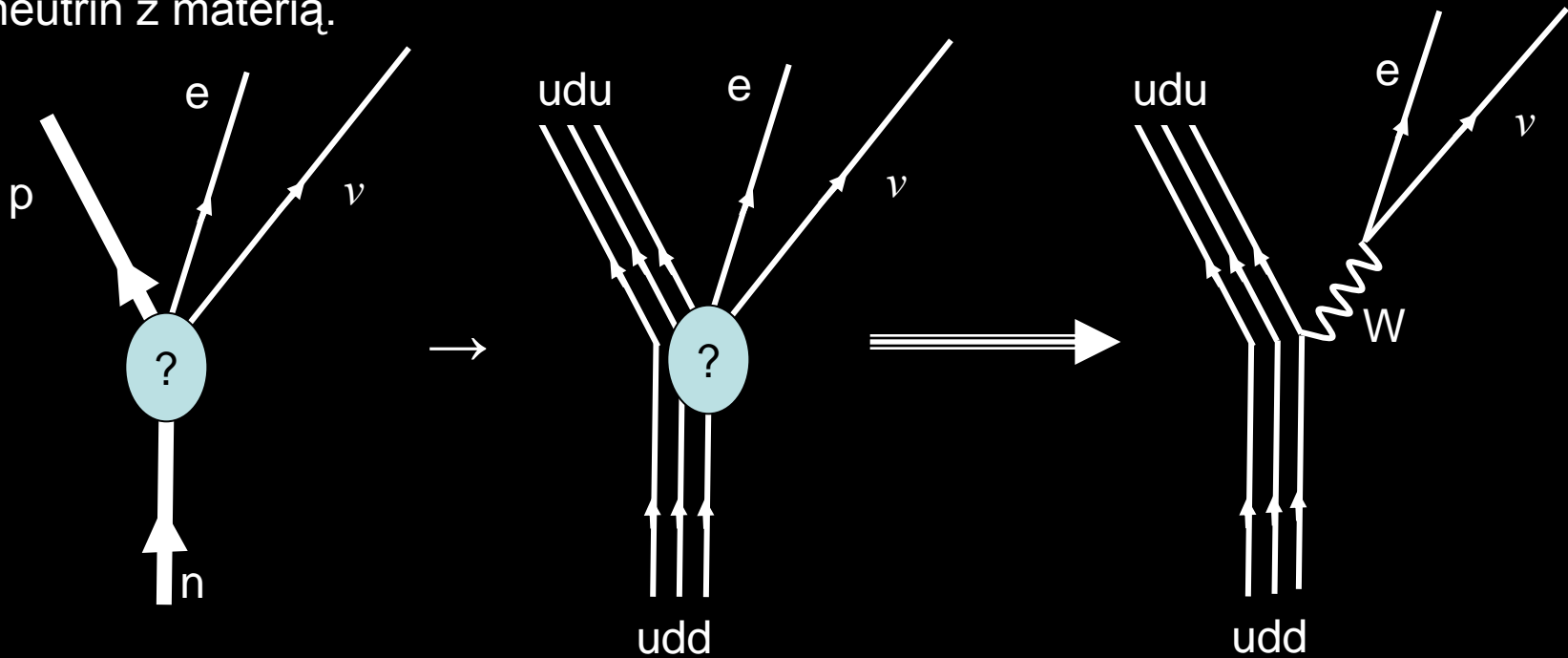
Efektywna stała sprzężenia maleje przy dużych energiach (asymptotyczna swoboda).

Brak zadowalającego opisu uwięzienia.

Grupa cechowania $SU(3)$ – grupa obrotów (z dodatkowym warunkiem) działająca w trójwymiarowej przestrzeni zespolonej kolorów.



Oddziaływania słabe – rozpad neutronu, rozpad mionu, ale także oddziaływanie neutrin z materią.



Jeśli ma to być symetria cechowania, to przynajmniej powinna „mieszać” zapachy w ramach generacji. Czyli obraca w dwuwymiarowej przestrzeni zespolonej.

**Bozon W – nośnik oddziaływań słabych – powinien być masywny! (nowość!)
I powinny być co najmniej 3 takie bozony.**

Ale teoria z symetrią cechowania powinna mieć bezmasowe bozony oddziaływań.
Jeśli zrezygnujemy (złamiemy jawnie) symetrię cechowania to nierenormalizowalna.

Mechanizm Higgsa: recepta na masywne bozony w teorii z cechowaniem:

Dodajemy do teorii jeszcze jedno pole – najprostsze, na które efektywnie działa grupa cechowania: dwuwymiarowe zespolone pole skalarne (Higgsa).

„Nawyk”: >>najmniej energii, gdy brak materii<<. Odrzucamy ten nawyk! Postulujemy, by najniższa energia związana z nowym polem była wtedy, gdy suma kwadratów jego składowych przybiera wyznaczoną wartość v . **Wyberzemy tak tę wartość, by mieć dobre wyniki.**

Ze względu na pożądaną symetrię, możemy wskazać tylko „kwadrat”, ale nie możemy wskazać żadnego „kierunku”, przy którym ta energia jest najmniejsza. Jest ich wiele – cała orbita grupy symetrii.

Ale przyroda może wybrać ten jeden „kierunek” spośród wielu „równie dobrych” (tak jak z ołówkiem na stole): **spontaniczne łamanie symetrii.**

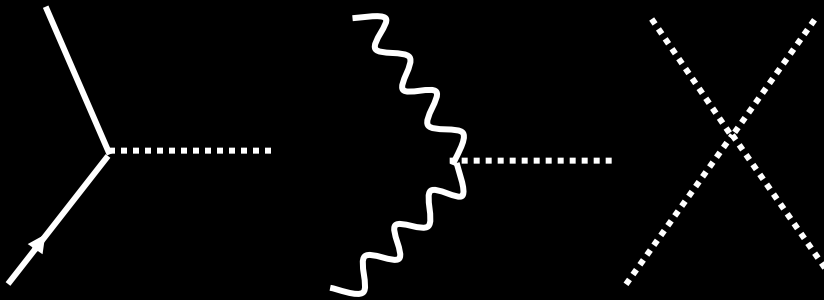
Matematycznie: wszędzie w czasoprzestrzeni występuje potencjał związany z polem Higgsa. Symetryczny ze względu na grupę cechowania. Ma minimum dla pola Higgsa różnego od zera.



Rozwijamy teorię wokół minimum (czyli przesuwamy pole: stare pole = stan minimum + nowe pole).

Grupa symetrii cechowania: $SU(2)_L \times U(1)$ – bo oddziaływania słabe da się połączyć, a nawet trzeba połączyć, z elektromagnetyzmem. („L” oznacza działanie jedynie na fermiony lewoskrętne.)

Otrzymujemy: 3 masywne bozony W^+ W^- i Z^0 ($v = 246$ GeV by mieć dobre masy) oraz bezmasowy foton oraz jedno rzeczywiste pole skalarne – pole Higgsa. „Przy okazji” także fermiony otrzymują masę dzięki sprzężeniu z polem Higgsa (część pochodząca od stanu minimum).



Dwa pierwsze diagramy podpowiadają jak wyprodukować Higgsa.

Najsilniej sprzęga się do najcięższych cząstek.

Już wiemy, że nie jest lżejszy niż 114 GeV i nie może być dużo cięższy.

Czy Higgs nadaje masę?

Jest niezbędny, by bozony wektorowe były masywne w teorii z symetrią cechowania.

Sprzęga się do fermionów, a „oddziaływanie” fermionów z „polem minimum” jest przyczyną pojawienia się mas fermionów w teorii. (Nie jest to jednak w tej chwili zupełnie niezbędne.) Oddziaływanie to nie wyjaśnia dlaczego masy fermionów mają takie a nie inne wartości.

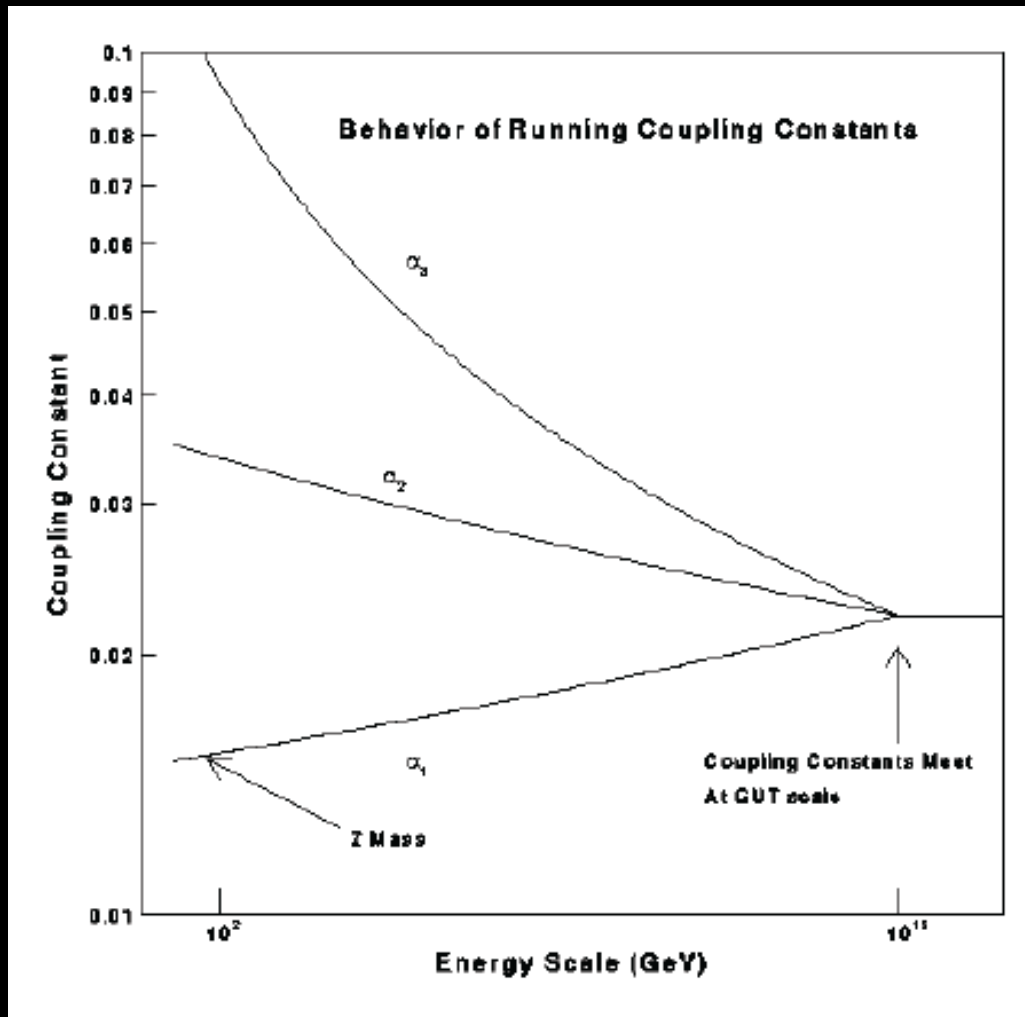
Popularne obrazki, przedstawiające mechanizm nadawania mas jako rodzaj tarcia, albo oddziaływania VIP-a z tłumem, mają swój urok, ale wprowadzają także błędne skojarzenia; w trakcie wszystkich tych przywołanych dla porównania przykładów, energia jest tracona i ciało zwalnia!

Moim zdaniem w doniesieniach o wielkim znaczeniu pola Higgsa dla naszego zrozumienia fenomenu posiadania masy przez ciała więcej jest marketingu niż głębokiej fizyki.

LHC powinien ustalić definitywnie, czy mechanizm Higgsa realizuje się w rzeczywistości. Jeśli ustali, że nie, to też będzie to bardzo ciekawe.



Szansa na unifikację oddziaływań?

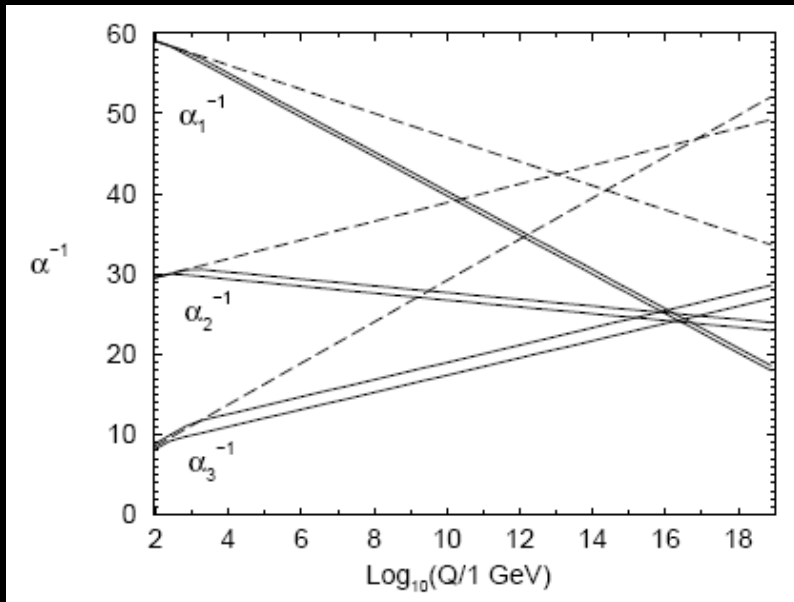


Stałe sprzężenia oddziaływań zmieniają się wraz ze wzrostem energii.

Spotkanie \approx unifikacja

Czy mają szansę się dokładnie spotkać?

To się daje policzyć:



Supersymetria musi być spontanicznie złamana.

W teorii jest dużo nowych cząstek i jeszcze więcej nowych parametrów – czy to będą nowe stałe przyrody?

W Modelu Standardowym (linie przerywane) stałe się nie spotykają.

Supersymetria pomaga!

Każda cząstka ma swojego supersymetrycznego partnera. Partnerami fermionów są bozony i odwrotnie.

	spin 0	spin $\frac{1}{2}$	spin 1
(s)leptony	$\begin{pmatrix} \tilde{e}_L \\ \tilde{\nu}_e \\ \tilde{e}_R \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} e_L \\ \nu_{eL} \\ e_R \end{pmatrix}$	
(s)kwarki	$\begin{pmatrix} \tilde{u}_L \\ \tilde{d}_L \\ \tilde{u}_R \\ \tilde{d}_R \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \\ u_R \\ d_R \end{pmatrix}$	
bozony i gaugina		gluina \tilde{g} fotino $\tilde{\gamma}$ zino \tilde{Z} wina \tilde{W}^\pm	gluony g foton γ Z° W^\pm
Higgs(ina)	$h^\circ, H^\circ, A^\circ$ H^\pm	$\tilde{H}_1^\circ, \tilde{H}_2^\circ$ \tilde{H}^\pm	

Minimalny Model Standardowy ma kilkadziesiąt cząstek i stałych sprzężenia! Np. do tej pory nie było wspomniane o parametrach mieszania kwarków w rozpadach słabych (macierz CKM) i o mieszaniu neutrin. Model Standardowy tego nie tłumaczy.

Proponowane jest wiele rozszerzeń MS i Supersymetrycznego MS. Większość z nich postuluje dodatkowe cząstki i oddziaływania. W zasadzie brak propozycji na sensowną (niesprzeczną z danymi eksperymentalnymi) redukcję liczby pól i parametrów.

Kwantowa teoria pola była budowana w oparciu o koncepcję cząstek jako obiektów punktowych. Obiekty niepunktowe miały się składać z obiektów punktowych. Alternatywa: teoria strun – punktem wyjścia są obiekty jednowymiarowe (struny). Różnorodność cząstek to przejaw różnorodności stanów wzbudzenia elementarnej struny.

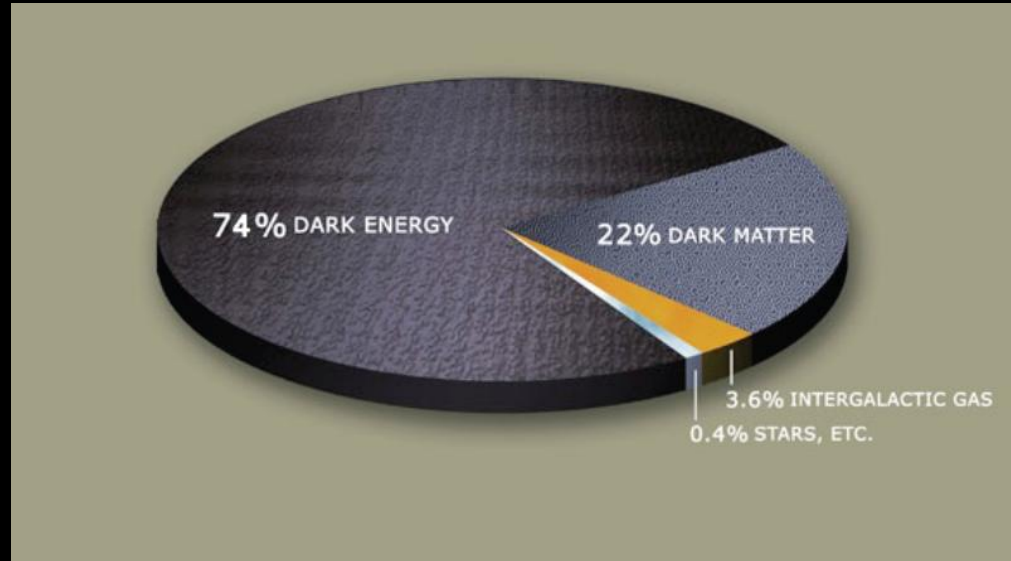
Konsystentne teorie strun muszą być budowane w czasoprzestrzeniach o większej niż 4 liczbie wymiarów. Dodatkowe wymiary umykają naszej percepcji, bo są zwarte i małe. Przykładem przestrzeni o jednym wymiarze „normalnym” i jednym „dodatkowym”- zwartym i małym – jest wąż ogrodowy.

Dodatkowych wymiarów musi być więcej niż jeden. Teoria + eksperyment pozwalają oszacować, że rozmiar charakterystyczny dodatkowych wymiarów jest rzędu mikronów lub mniejszy.



Inne elementy układanki:

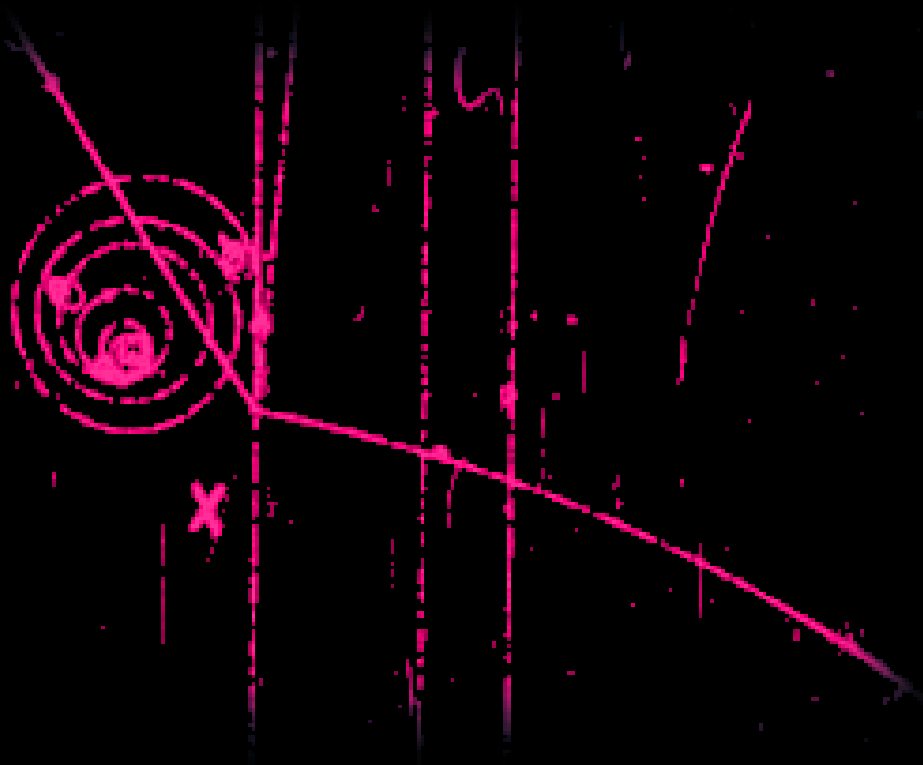
Co tworzy ciemną materię, której wpływ na zjawiska astronomiczne obserwujemy?



Czy w Modelu Standardowym znajdziemy wytłumaczenie zagadki braku antymaterii / istnienia materii? Czy odtworzymy kosmologiczną historię materii w Wszechświecie?

Czy w Modelu Standardowym znajdzie się miejsce na niestałe stałe przyrody, jeśli potwierdzą się niedawne doniesienia?

Czego brakuje w Modelu Standardowym? – Koncepcje i idee



Dziękuję Państwu
za uwagę!