

Wszechświat cząstek elementarnych




# WYKŁAD 13

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

23.05.2012

Poza Modelem Standardowym

# Problemy Modelu Standardowego

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

$$M_H(100 \text{ GeV}) \ll M_{\text{Planck}} (10^{19} \text{ GeV})$$

Często formułowany jako różnica skali EW ( $\sim 1 \text{ TeV}$ ) i skali Plancka

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

Odstępstwa od Modelu? No, i gdzie jest Higgs?

# Problem hierarchii w MS

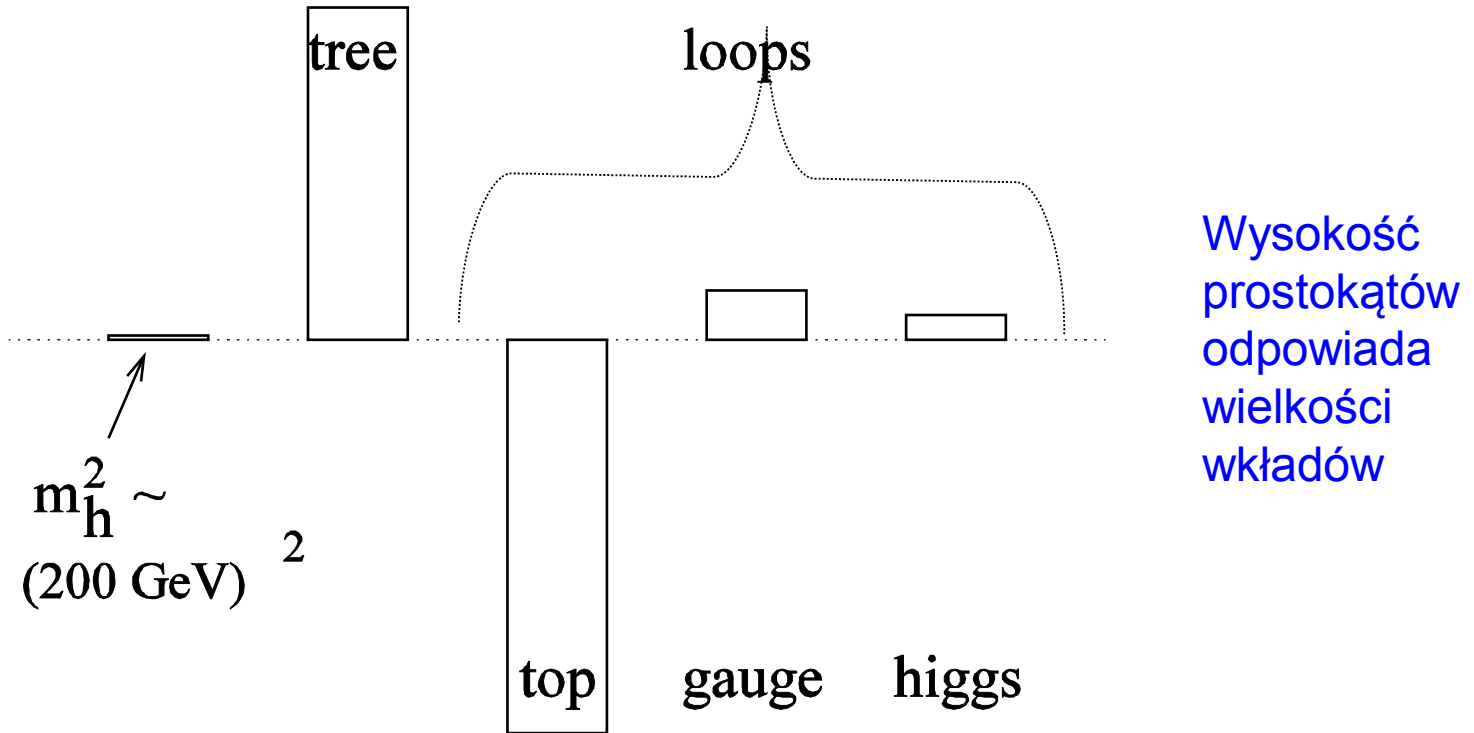
Model Standardowy działa dobrze przy obecnych energiach- a do jakich energii ( $\Lambda$ ) może tak dobrze działać?

Poprawki kwantowe np. do masy cząstki Higgsa - pętle z energiami dowolnie dużymi. Jeśli uwzględnimy wkłady tylko do energii (skali)  $\Lambda$

**Poprawka do  $m \sim$  sprzężenie  $\times \Lambda$**

Aby ustabilizować masę H na poziomie 100 GeV - nienaturalne dopasowanie parametrów modelu (fine tuning)

# Fine tuning dla $\Lambda = 10 \text{ TeV}$



Poprawki kwantowe do masy cząstki Higgsa - od pętli z kwarkami ( w tym kwarkiem top), z bozonami cechowania W/Z, i z cząstkami Higgsa muszą się bardzo precyzyjnie skracać z wkładem najniższego rzędu (tree), aby uzyskać przewidywanie na masę cząstki Higgsa około 200 GeV (*precyzyjne dopasowanie*)

# Duża różnica skal zbyt dokładne dopasowanie parametrów

W LHC energia ok 10 TeV (fine tuning 1/100)  
→ oczekiwane efekty nowej fizyki  
(nowe cząstki i oddziaływania)

np.

skracanie się dużych wkładów w supersymetrii  
(top i stop)

nowe rezonanse z masami rzędu TeV

więcej wymiarów przestrzennych ...

# Poza Modelem Standardowym

→ głównie dążenie do unifikacji

- Model Standardowy: symetria cechowania  
 $SU(2) \times U(1) \times SU(3)_c$   
EW:  $SU(2) \times U(1)$  → częściowa unifikacja sił słabych i el-m
- **Wielka Unifikacja (Grand Unified Theory - GUT)**  
→ łączenie oddziaływań EW i silnych. Symetria cechowania GUT „widoczna” przy energiach powyżej  **$10^{16}$  GeV** - zbliżanie się stałych sprzężenia. Różne modele.
- W fundamentalnym opisie grawitacji naturalną skalą jest skala Plancka:  
masa Plancka  **$1.2 \times 10^{19}$  GeV**  
długość Plancka  **$1.6 \times 10^{-35}$  m**

*Polecam artykuł J. Lukierskiego:*

*Od Modelu Standardowego do teorii M: Teorie Wszystkiego*

<http://postepy.fuw.edu.pl/zjazdy/Gdansk2003/PF404Lukierski.pdf>

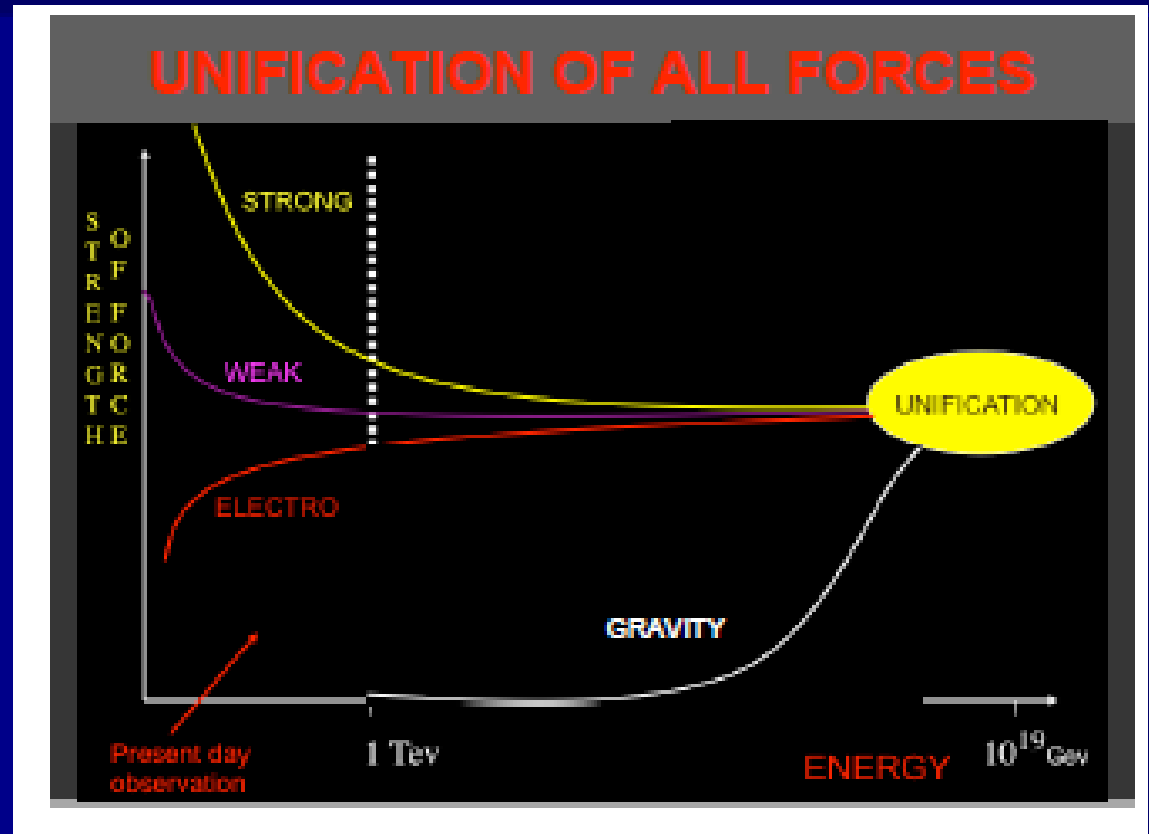
# Unifikacja z grawitacją?

- Dotychczas zajmowaliśmy się głównie cząstkami elementarnymi i ich oddziaływaniami
- Idea unifikacji oddziaływań dla bardzo dużych energii to najważniejszy obecnie kierunek badań teoretycznych
- A co z grawitacją? Bardzo słaba dla małych energii (dużych odległości) - wzmacnia się dla dużych energii → „siła” porównywalna do innych oddziaływań dla (masy) energii Plancka. Pełna unifikacja sił?

# Unifikacja z grawitacją

David Gross: The Coming Revolutions in Theoretical Physics

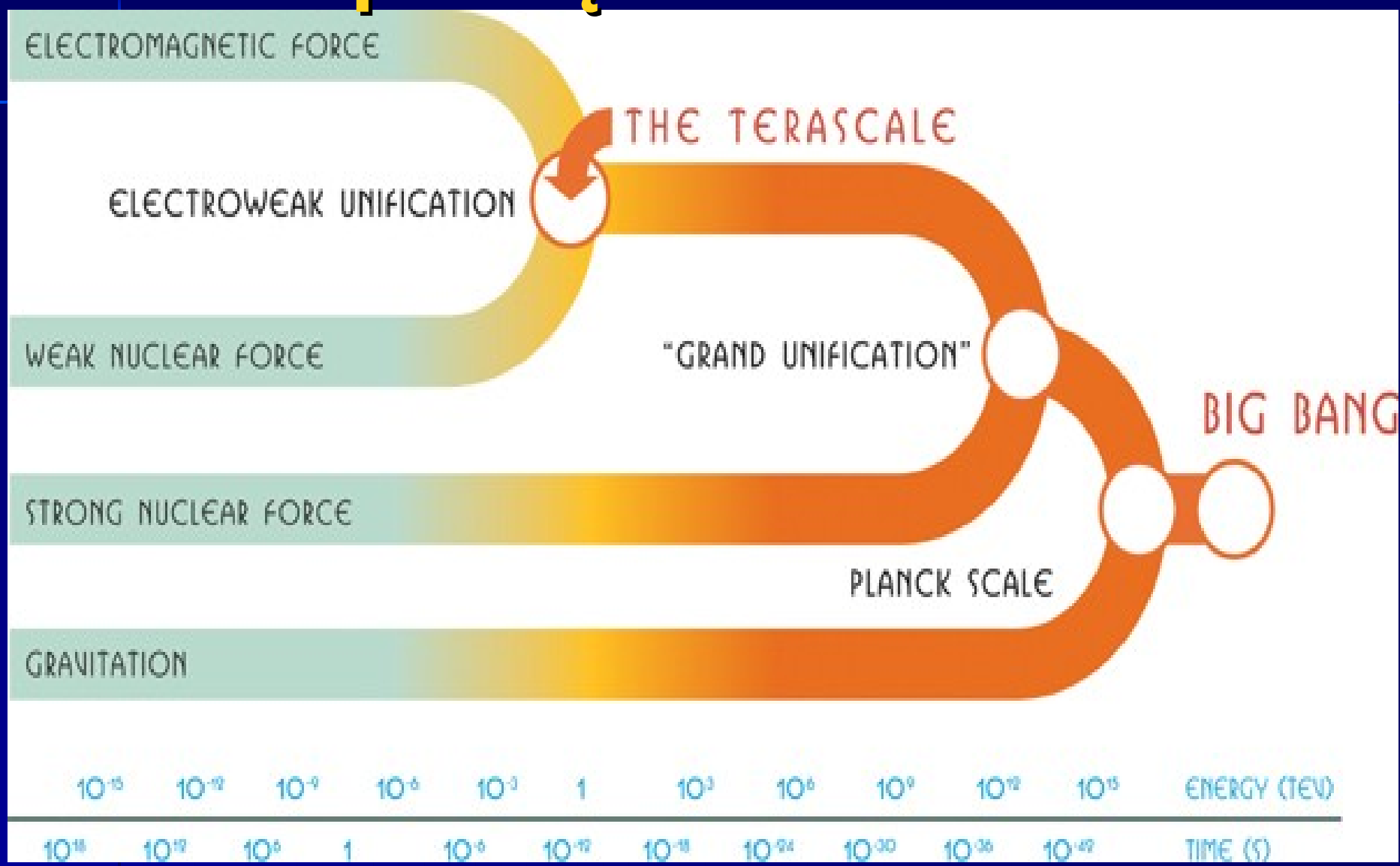
<http://www.youtube.com/watch?v=AM7SnUlw-DU&feature=channel>



„Siła” grawitacji  $F \sim M^2 \sim E^2$  i dlatego rośnie tak szybko dla dużych E



# UNIFIKACJA z grawitacją a początek Wszechświata



# Oddziaływanie grawitacyjne

Klasycznie oddziaływanie grawitacyjne opisuje prawo Newtona. Einstein (1915-17r) powiązał oddziaływanie grawitacyjne z dynamiką czasoprzestrzeni

Ale kłopot z opisem kwantowym grawitacji – fluktuacje czasoprzestrzeni dla skali Plancka niekontrolowalne

Trzeba wyjść poza teorię Einsteina, np. **teoria strun**. Struny powstały aby opisać oddz. silne → ale okazuje się, że w teorii strun grawitacja pojawia się automatycznie. **Teoria strun to** spójna i skończona (tzn. bez nieskończoności) kwantowa teoria grawitacji – ale czy jednoznaczna?

# Wyjście poza Model Standardowy

1/ Rozszerzenie symetrii  
→ supersymetria

2/ Rozszerzenie czasoprzestrzeni  
→ dodatkowe wymiary przestrzenne

3/ "Rozszerzenie" obiektów  
→ rozciągnięte obiekty fundamentalne  
(struny, membrany i brany p-wymiarowe)

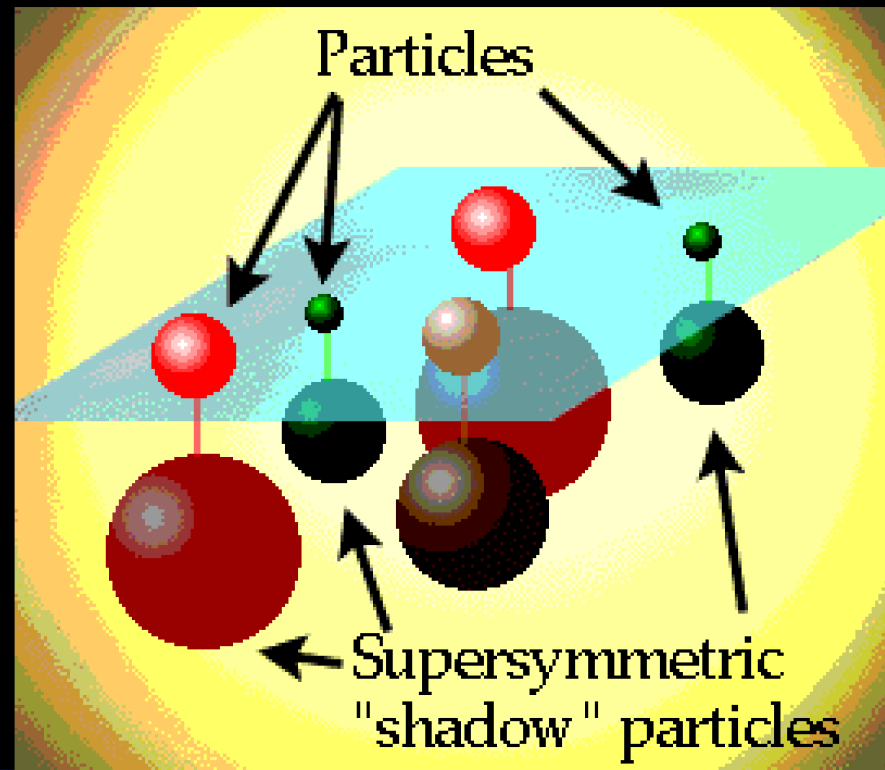
Ku **Teorii Wszystkiego**-  
pełna unifikacja wszystkich oddziaływań  
fundamentalnych i renormalizowalność

*Uwaga- badania nad substrukturą w zaniku*

# SUPERSYMETRIA

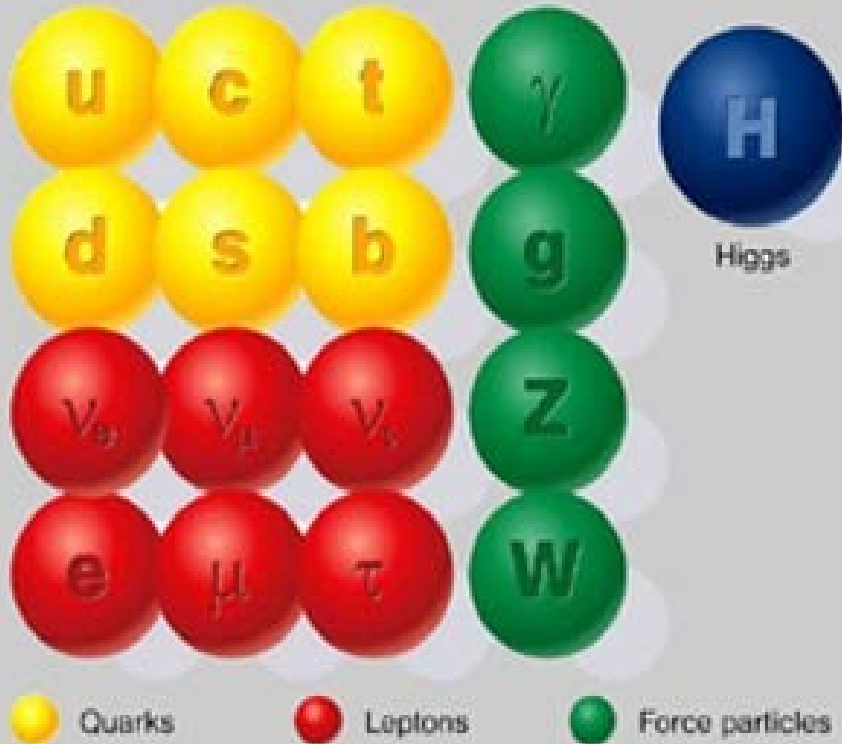
- W przyrodzie tylko dwa typy cząstek: fermiony i bozony
- Supersymetria zakłada symetrię fermion  $\leftrightarrow$  bozon, czyli wymaga **podwojenia** składu cząstek fundamentalnych
- Supersymetryczni partnerzy znanych cząstek z MS = cząstki SUSY

Cząstki SUSY muszą być b. masywne bo ich nie obserwujemy.  
Supersymetria musi być łamana

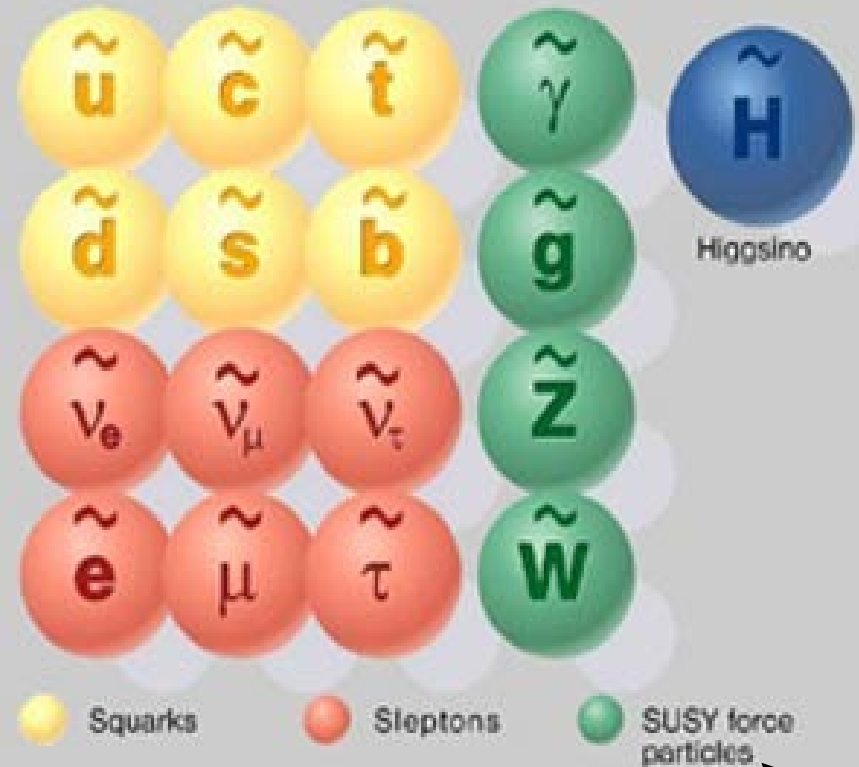


# Słodcy partnerzy

## Standard particles



## SUSY particles



skwarki, sleptony, gaugina, higgsina  
spin 0, spin 1/2

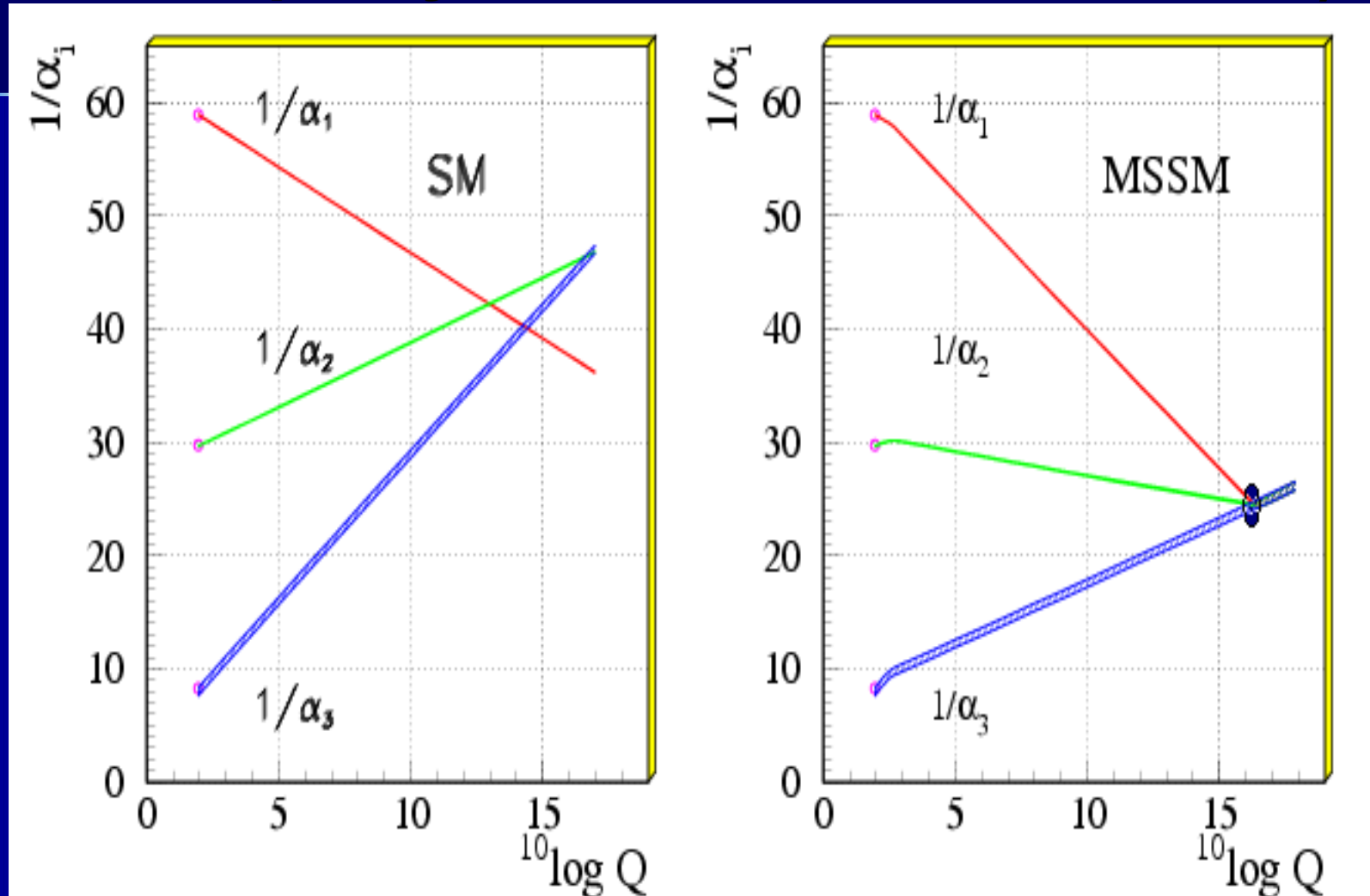
**Masy ~ 1 TeV**

Podwojenie dubletów skalarów  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$

# Supersymetria jest super

- Problem hierarchii usunięty – kasowanie się wkładów od fermionów i bozonów w pętlach
- Unifikacja oddziaływań (GUT): lepsze „zbieganie” stałych sprzężenia do siebie
- Założenie dodatkowe: symetria  $R$  (liczba kwantowa  $R$  i jej zachowanie), więc najlżejsza cząstka SUSY jest trwała → kandydat/tka na **ciemną materię**

# Unifikacja sił w MS i MSSM (Minimal Supersymmetric Standard Model)



Oś y: kolejno od góry  $1/\alpha_{em}$ ,  $1/\alpha_W$ ,  $1/\alpha_s$ ; oś x: logarytm dziesiętny od skali energii  $Q/\text{TeV}$

# Minimalny Standardowy Model Supersymetryczny (MSSM)

## - sektor Higgsa

- **Dwa** dublety pól skalarnych  $\rightarrow$  aby nadać masy wszystkim cząstkom fundamentalnym
- Przewidywanie: istnieje 5 cząstek Higgsa (spin 0)  
 **$h, H, A$  (neutralne) i  $H^\pm$  (naładowane)**

Uwaga -  $h$  ma własności zbliżone do cząstki Higgsa w MS, i dlatego nowe dane z LHC nie wykluczają MSSM !

- **Higgsina** o spinie  $\frac{1}{2}$   
**Gaugina** (gaudżina, spin  $\frac{1}{2}$ : *fotino, gluino, wino, zino*)  
mieszają się z higgsinami  $\rightarrow$  fizyczne cząstki to:  
**neutralina** (neutralne) i **czardżina** (naładowane)



# SUPERSYMETRIA

wg D. Grossa

Odkrycie supersymetrii –

to jak odkrycie kwantowych wymiarów  
czaso-przestrzeni

Naturalne i unikatowe rozszerzenie  
relatywistycznych symetrii natury

---

LHC- dwa główne kierunki poszukiwań:  
cząstki Higgsa i cząstki SUSY  
wciąż brak konkretnych sygnałów ...

# Pierwsza Teoria Wielkiej Unifikacji: **SU(5)**

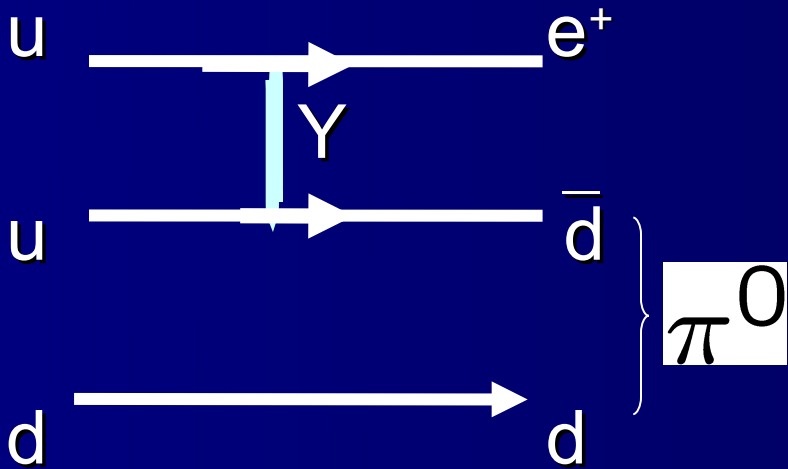
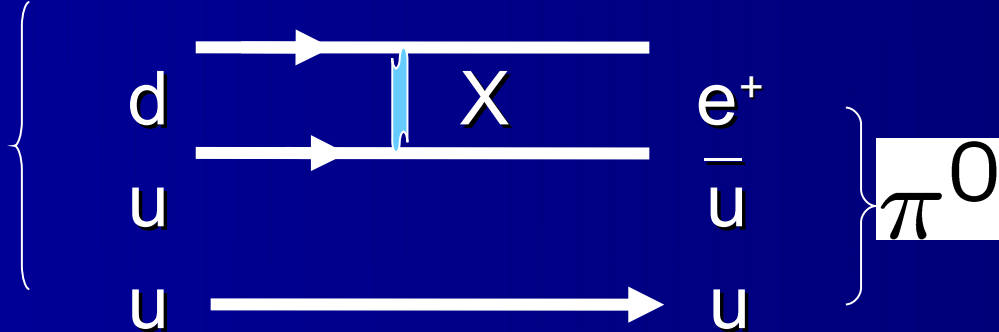
- Symetria cechowania SU(5) (zawiera SU(2)xU(1)xSU(3) jako podgrupę) – idea w 1974 r  
Glashow, Georgi
- w multipletach SU(5) zarówno kwarki jak i leptony, stąd możliwość zamiany kwarków w leptony i odwrotnie  
(niezachowanie liczby barionowej B i leptonowej L!)
- 12 kolorowych bozonów cechowania (leptokwarki):  
X (ład. el.  $-1/3 e$ ) i Y ( $-4/3 e$ )  
plus gluony, foton, W/Z - razem 24 bozony cechowania
- 3 generacje fermionów (15 stanów) np.  
 $u_R, u_G, u_B, d_R, d_G, d_B, e^-, \nu_e$  w różnych stanach spinowych;
- W tym modelu mamy skwantowanie ładunku elektr.:  
ładunek elektronu = - ładunek protonu

# Rozpad protonu $p \rightarrow e^+ \pi^0$ w $SU(5)$

W tym modelu proton się rozpada w wyniku wymiany bozonów  $X/Y$  za szybko: czas życia  $10^{30-31}$  lat , a dane  $>10^{31-33}$  lat  
 - dlatego ten model został odrzucony

## Przykłady procesów z wymianą $X$ i $Y$

proton



# KALUZA-KLEIN THEORY

Przykład pierwszej teorii z dodatkowymi wymiarami przestrzennymi

D.Gross



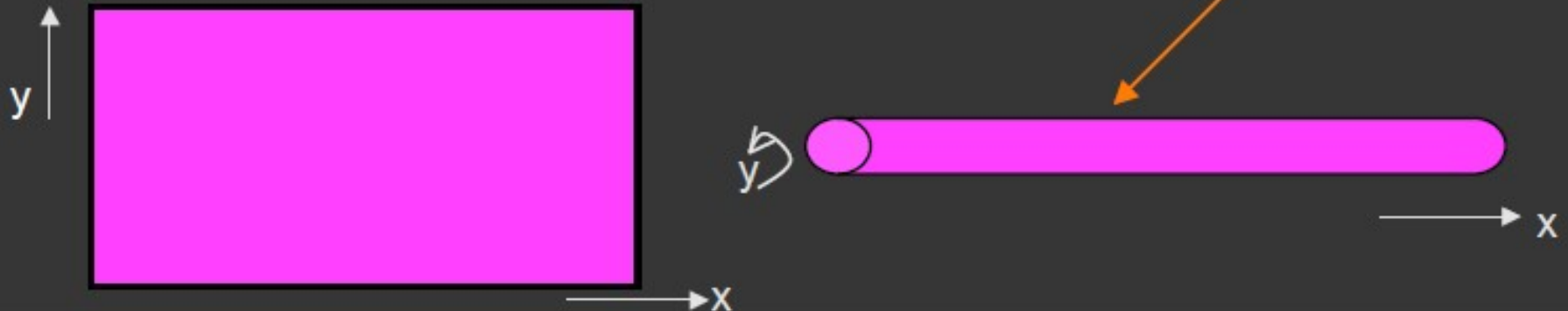
(1919-21) If space-time is dynamical there might exist new, curled up, spatial dimensions.

Jeśli czaso-przestrzeń jest dynamiczna mogą istnieć nowe, zwinięte, małe wymiary przestrzenne  
To może wyjaśnić oddziaływania el-magn. jako efekt grawitacji w 5 wymiarach !



Einstein was fascinated by this idea and came back to it over and over again---for over 30 years.

Can explain  
E&M as an  
effect of gravity  
in 5 dimensions



# Nowe idee – 1998 r

## duże dodatkowe wymiary...

Grawitacja i oddz. EW zbliżona „siła” dla energii  $\sim 1\text{TeV}$   
(unifikacja oddz. z cechowaniem i grawitacji)

To możliwe, bo prawo Newtona zmodyfikowane  
np.  $1/r^2 \rightarrow 1/r^4$

(gdy dwa dodatkowe zwinięte wymiary przestrzenne)

Oddz. grawitacyjne dokładnie zbadane do odl. 1 cm (a  
od 1 cm do  $10^{-33}$  cm ???)

Cząstki SM żyją w 4 wymiarach (3+1), grawiton w  
dodatkowych..

# Superstruny

- Teoria Wszystkiego (Theory of Everything) połączenie wszystkich oddziaływań wraz z grawitacją. W kwantowej grawitacji – oddziaływania punktowe, a to prowadzi do osobliwości (nieskończonych wyrażeń)
- **Superstruny** – przykład Teorii Wszystkiego. Zastępujemy cząstki punktowe **strunami o skończonej długości**
- W grawitacji: skale Plancka  $l_{Pl}=1.6 \cdot 10^{-35}$  m,  $M_{Pl}=1.2 \cdot 10^{19}$  GeV
- Różne wzbudzenia strun  $\rightarrow$  różne cząstki fundamentalne
- **Superstruny - teoria renormalizowalna w przestrzeni o liczbie wymiarów 10 lub więcej**
- Parametr opisujący struny  $\alpha'$  - ten sam co w oddziaływaniach hadronów (bo tu też struny!)
- Superstruny – wciąż brak konkretnych przewidywań i bardzo wiele możliwych sformułowań tej teorii

# THE ACHIEVEMENTS OF STRING THEORY

- A Consistent, Logical Extension of the Conceptual Framework of Physics

## REVOLUTIONS IN PHYSICS

Relativity	$c$	Velocity of light
Quantum Mechanics	$h$	Quantum of action
String Theory	$G$	Planck length

- A Consistent and Finite Quantum Theory of Gravity
- A Rich Structure That Could Yield a Unique and Comprehensive Description of the Real World (a T.O.E)

# Ale są i inne opinie

M. Veltman (Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics, 2003):

*..this book is about a physics, and this implies that the theoretical ideas discussed must be supported by experimental facts. Neither supersymmetry nor string theory satisfy this criterion. They are figments of the theoretical mind.*

*To quote Pauli: „They are not even wrong.”*

*They have no place here.*



# Pytania do wykładu 13

Jaki parametr występuje zarówno w opisie hadronów jak i teorii strun?

Co oznacza skrót GUT?

Czy Wielka Unifikacja dotyczy połączonego opisu oddziaływań fundamentalnych wraz z grawitacją?

Dla jakich energii przewiduje się realizację Wielkiej Unifikacji?

Czy supersymetria została odkryta?

Jak nazywają się supersymetryczni partnerzy kwarków?

Ile cząstek Higgsa przewiduje MSSM?

Czy szybkość rozpadu protonu w SU(5) zgadza się z danymi doświadczalnymi?

Czy liczba barionowa jest zachowana w SU(5)?

Czy istnieją teorie zakładające różną od 4 liczbę wymiarów?

Jaka jest główna idea teorii superstrun?

Czy teoria superstrun uwzględnia grawitację?

~~Czy teoria superstrun jest renormalizowalna?~~