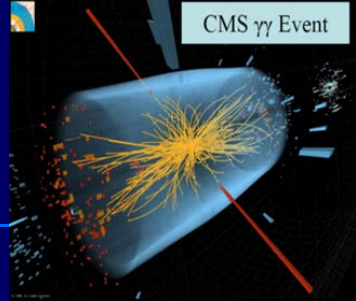


# Wszechświat cząstek elementarnych dla humanistów



## WYKŁAD 14

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

## Poza Modelem Standardowym

# 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*

# Poza Modelem Standardowym

→ 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**

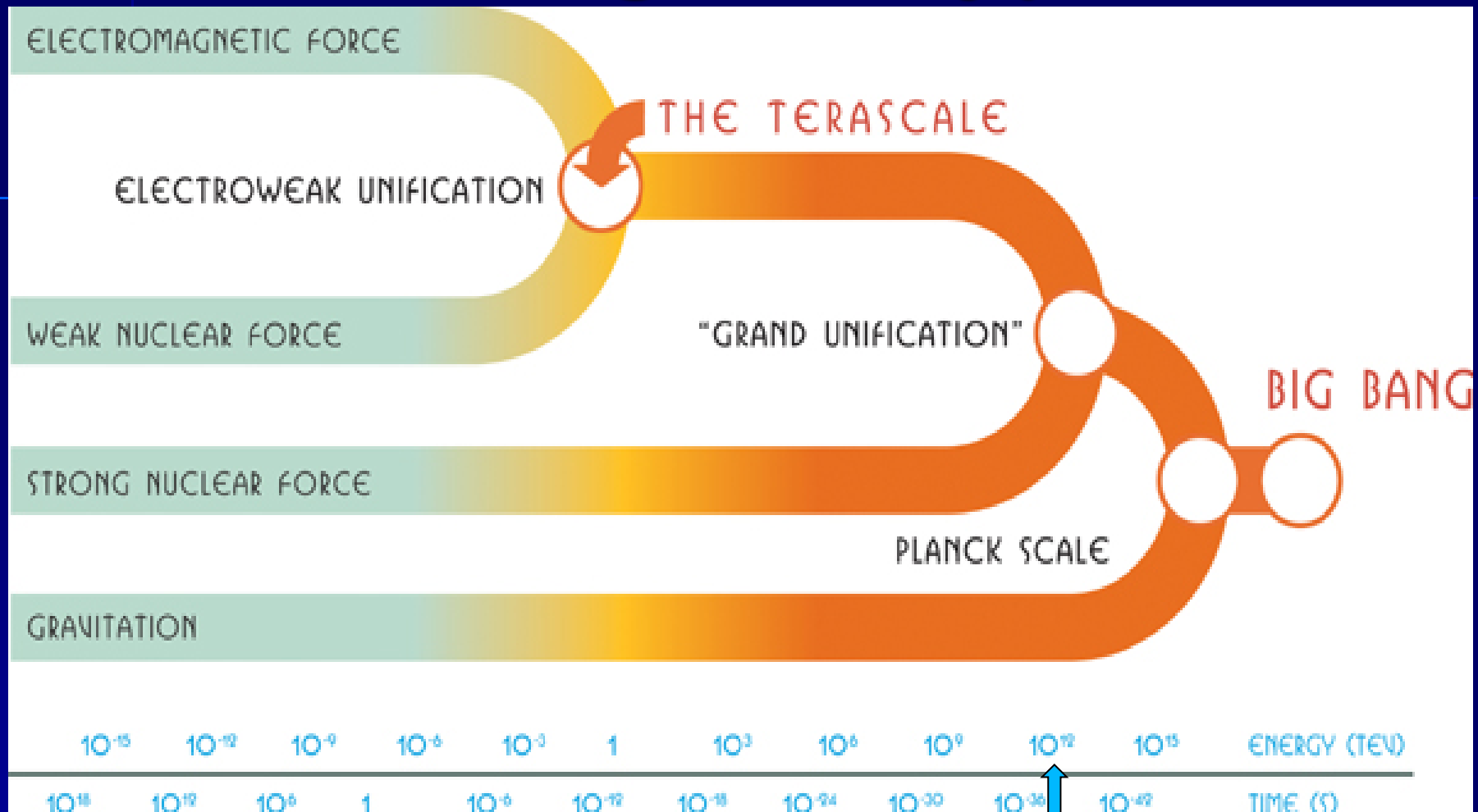
**Teoria Wszystkiego** - pełna unifikacja wszystkich oddziaływań fundamentalnych (razem z grawitacją)

*Polecam: J. Lukierski: Od Modelu Standardowego do teorii M: Teorie*

*Wszystkiego*


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

# UNIFIKACJA z grawitacją



- Grawitacja - bardzo słaba dla małych energii (dużych odległości) - wzmacnia się dla dużych energii → „siła” porównywalna do innych oddziaływań dla (masy) energii Plancka. Pełna unifikacja sił?

# Problemy Modelu Standardowego

- Wiele parametrow (np. masy) - w innym modelach więcej
- Dlaczego trzy rodziny? – żaden model tego nie wyjaśnia
- Niezerowa masa neutrin – łatwe do uwzględnienia
- Problem hierarchii - 

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

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? Czy odkryty w 2012r bozon Higgsa zgodny z MS ?

# Niezerowa masa neutrin

- W Modelu Standardowym (masa ZERO)
  - tylko lewe neutrina i prawe antyneutrina
- Jeśli masa różna od zera (2001 r)
  - dodatkowe stany neutrin i antyneutrino.
- Ale oddziaływania słabe tych dodatkowych stanów z bozonami cechowania W i Z silnie tłumione (zgodność z doświadczeniem).

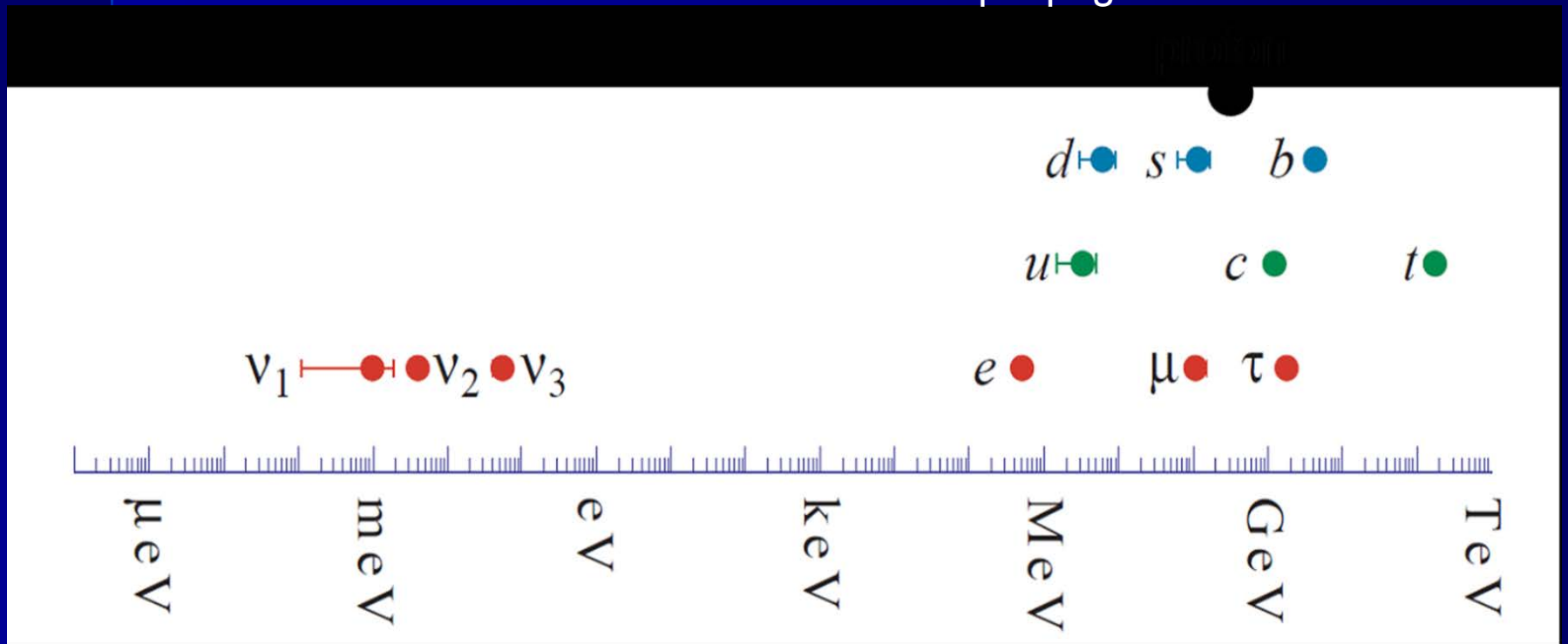
⇒ ograniczenie na masę  
neutrino elektronowego:

$$m_{\nu} < 2.2 \text{ eV} \quad (95\% \text{ CL})$$

→ MS rozszerza się tak, aby sektor EW wiązał się z oddzielną symetrią SU(2) dla lewych i prawych fermionów. I dodatkowo wprowadza się mechanizm tłumienia, tłumaczący również skrajnie małe masy neutrin w porównaniu z innymi masami fermionów

# Masy neutrin

[neutrino.ift.uni.wroc.pl/?page=Neutrina/neutrina.html](http://neutrino.ift.uni.wroc.pl/?page=Neutrina/neutrina.html)



# Problem hierarchii w MS

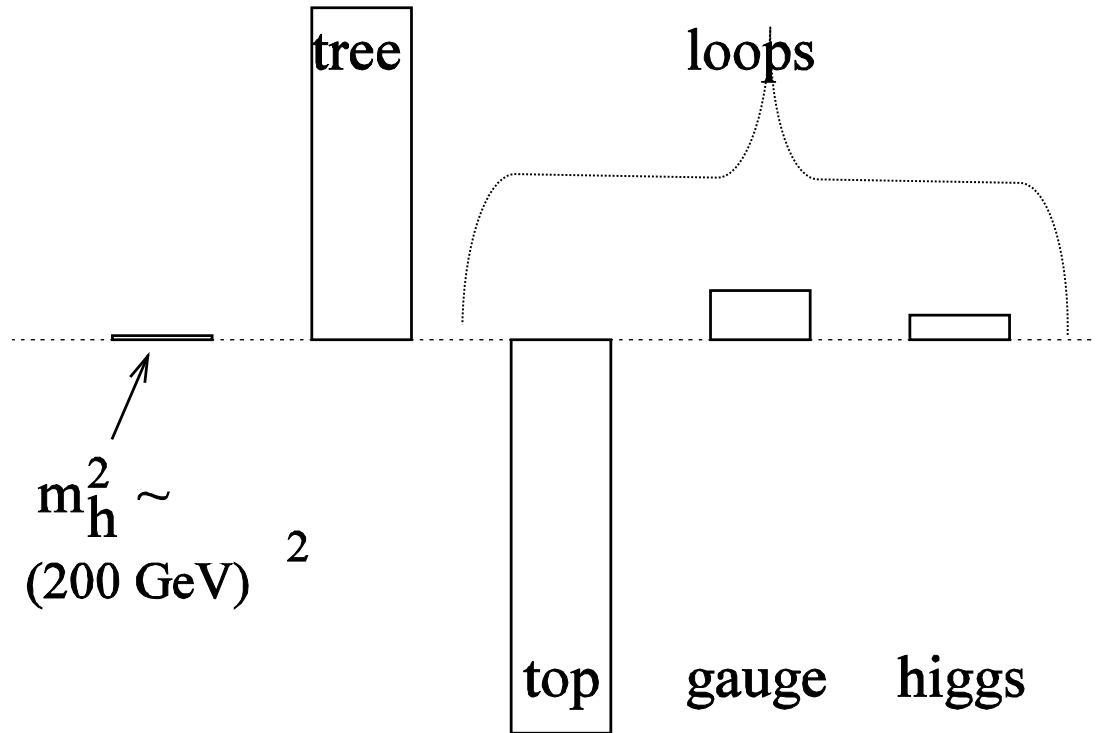
- Model Standardowy działa dobrze przy obecnych energiach- a do jakich energii ( $\Lambda$ ) możemy go stosować?
- Poprawki kwantowe np. do masy cząstki Higgsa - pętle z energiami dowolnie dużymi. Jeśli uwzględnimy wkłady tylko do energii (skali)  $\Lambda$

**Poprawka do masy H  $\sim$  sprzężenie  $\times \Lambda$**

- Dla masy H około 100 GeV - nienaturalne dopasowanie parametrów modelu (fine tuning)



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



Schmaltz'  
2000

Wysokość  
prostokątów  
odpowiada  
wielkości  
wkładów

Poprawki kwantowe do masy cząstki Higgsa - od pętli z kwarkami ( w tym kwarku 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 energii - niezwykle dokładne dopasowanie parametrów

W LHC energia ok 10 TeV (fine tuning 1/100)

→ oczekiwane efekty nowej fizyki

(nowe cząstki i oddziaływania)

np.

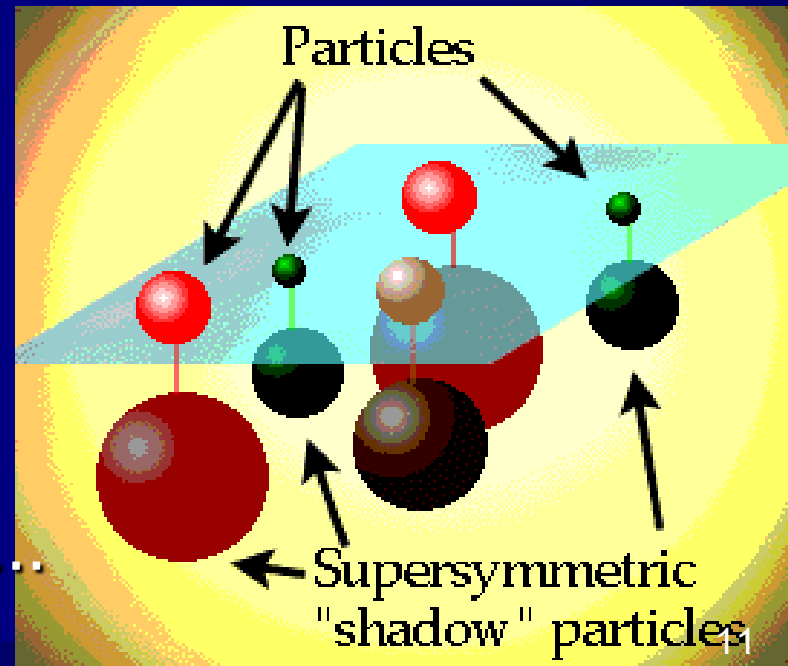
- skracanie się dużych wkładów w Modelu Supersymetrycznym (wkłady od top i stop)
- nowe rezonanse z masami rzędu TeV
- więcej wymiarów przestrzennych ...

# SUPERSYMETRIA

- W przyrodzie tylko dwa typy cząstek:  
fermiony i bozony
- Supersymetria zakłada symetrię  
fermion  $\leftrightarrow$  bozon
- >wymaga **podwojenia** składu cząstek fundamentalnych

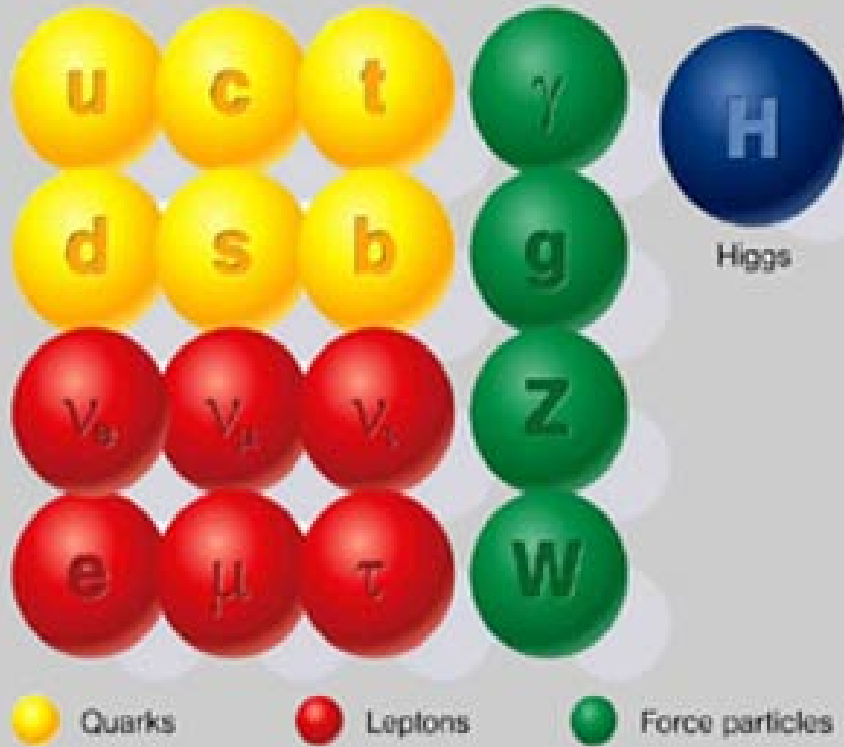
- Supersymetryczni partnerzy znanych cząstek z MS to **cząstki SUSY**

Muszą być b. masywne bo ich nie obserwujemy. Więc Supersymetria musi być łamana ...

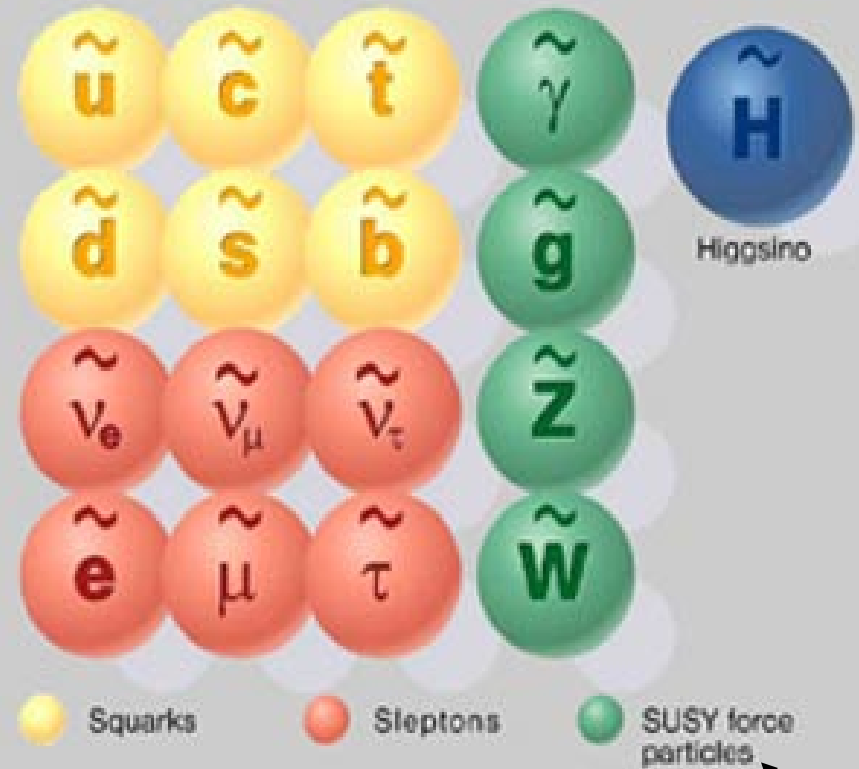


# Słodcy partnerzy

## Standard particles



## SUSY particles



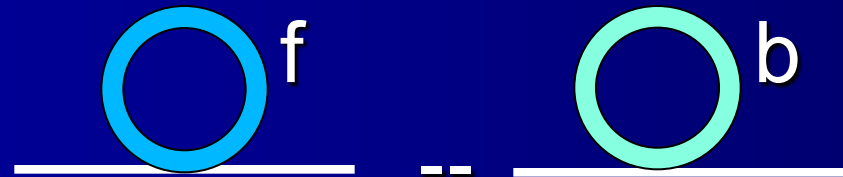
skwarki, sleptony, gaugina, higgsina  
spin 0 spin 1/2

Masy  $\sim 1$  TeV

Podwojenie dubletów skalarów  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  12

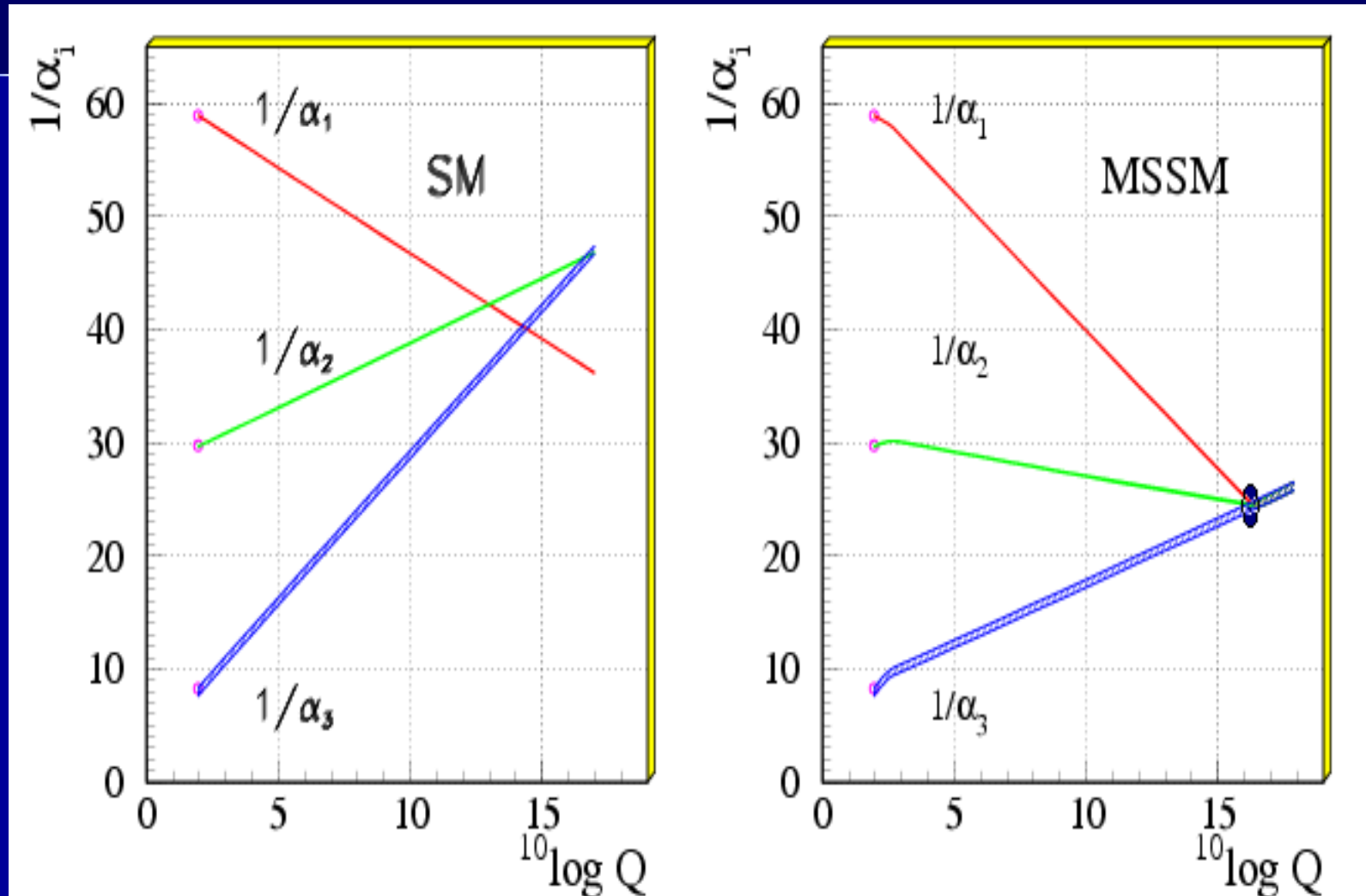
# Supersymetria jest super

- 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/ek Higgsa i cząstki SUSY

wciąż brak konkretnych sygnałów dt SUSY...



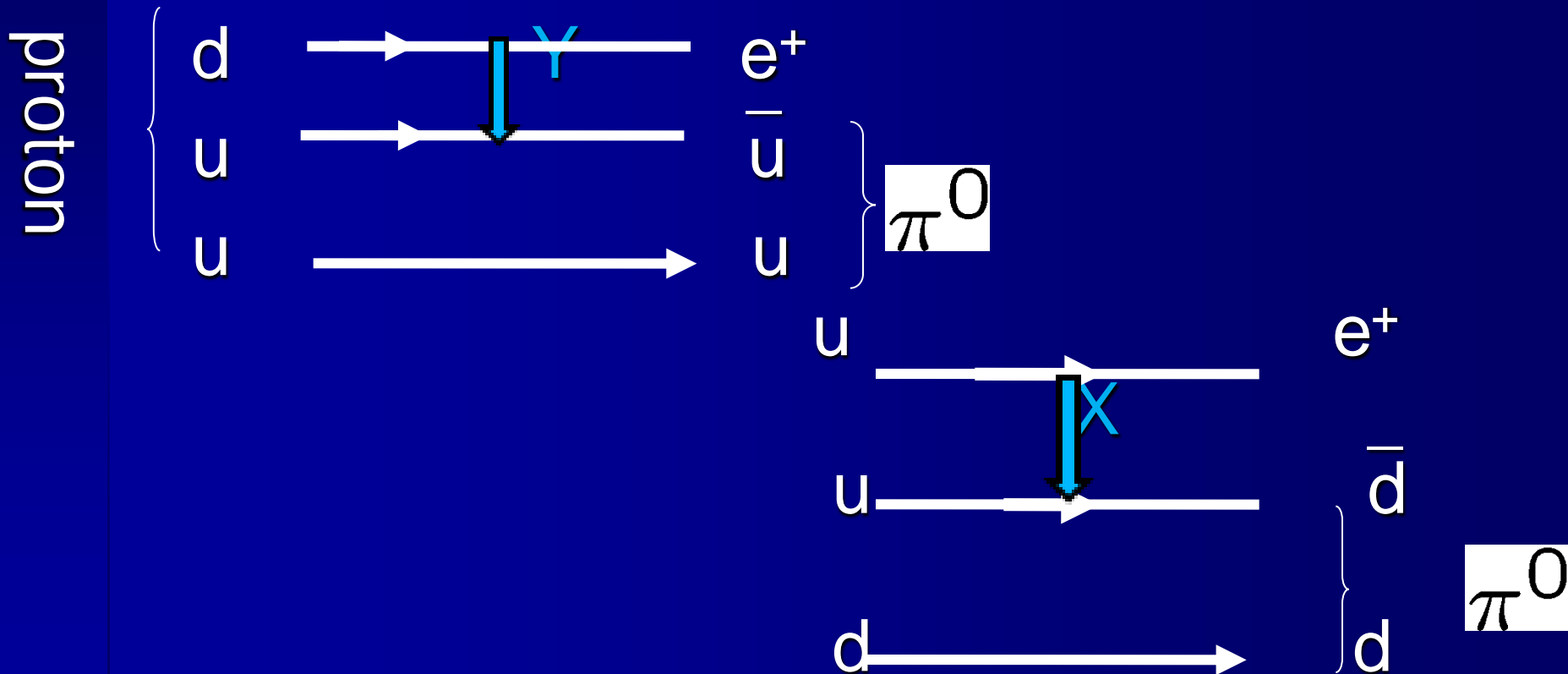
# Pierwsza Teoria Wielkiej Unifikacji: **SU(5)**

- 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.  $-1/3$ ) i Y ( $-4/3$ )  
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 el. :  
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  $p$   $10^{30-31}$  lat , a dane  $>10^{31-33}$  lat  
 - dlatego ten model został odrzucony

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



# Oddziaływanie grawitacyjne

- Klasycznie oddziaływanie grawitacyjne opisuje prawo Newtona. Einstein (1915-17r) powiązał oddziaływanie grawitacyjne z dynamiką czasoprzestrzeni
- Problem z opisem kwantowym grawitacji – fluktuacje czasoprzestrzeni dla skali Plancka niekontrolowalne
- Trzeba wyjść poza teorię Einsteina, np. **teoria strun**. Struny (hadronowe) zaproponowano aby opisać oddz.silne → ale okazuje się, że w teorii strun grawitacja pojawia się automatycznie. **Teoria strun (superstrun)** to spójna i skończona (tzn. bez nieskończoności). Kwantowa teoria grawitacji – ale czy jednoznaczna?

# KALUZA-KLEIN THEORY

Przykład pierwszej teorii z dodatkowymi wymiarami przestrzennymi

D.Gross



T. Kaluza



O. Klein

(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



nowa praca <http://xxx.lanl.gov/abs/hep-th/9410046v1>

# Nowe idee – 1998 r

## duże dodatkowe wymiary...

- Zał. grawitacja i oddz. EW - zbliżona „siła” dla energii  $\sim 1 \text{ TeV} !!!$

(unifikacja oddz. z cechowaniem i grawitacji)

- Możliwe, jeśli 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 wymiarach

# 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.*





z dn. 14.05.2014

# Pytania do wykładu

Wymień 3 problemy Modelu Standardowego

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 czasoprzestrzeni?

Jaka jest główna idea teorii superstrun?

Czy teoria superstrun uwzględnia grawitację?

Czy teoria superstrun jest renormalizowalna?

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