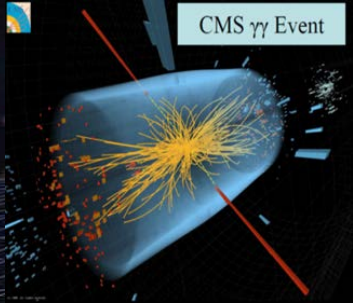


Wszechświat cząstek elementarnych dla humanistów



WYKŁAD 12

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

Poza Modelem Standardowym

Problemy Modelu Standardowego

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

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

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 ?
M. Krawczyk, AF. Żarnecki - Wykład 12

Poza Modelem Standardowym

→ dążenie do unifikacji

- Model Standardowy: symetria cechowania

$$SU(2) \times U(1) \times SU(3)_c$$

ElectroWeak: $SU(2) \times U(1)$ częściowa unifikacja sił słabych i em

- **Wielka Unifikacja (Grand Unified Theory - GUT)**

→ łączny opis 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 **1.2×10^{19} GeV**

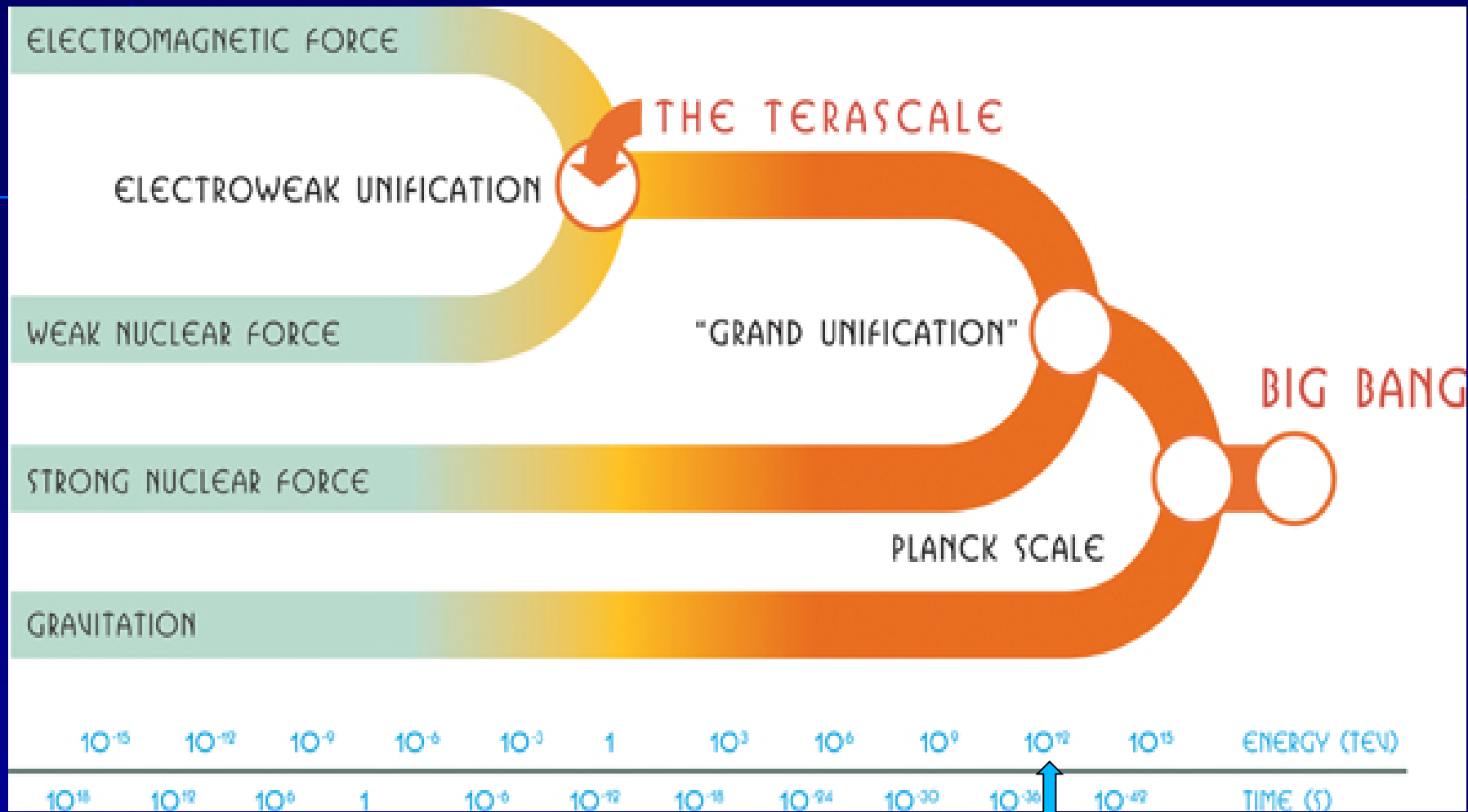
długość Plancka **1.6×10^{-35} m**

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

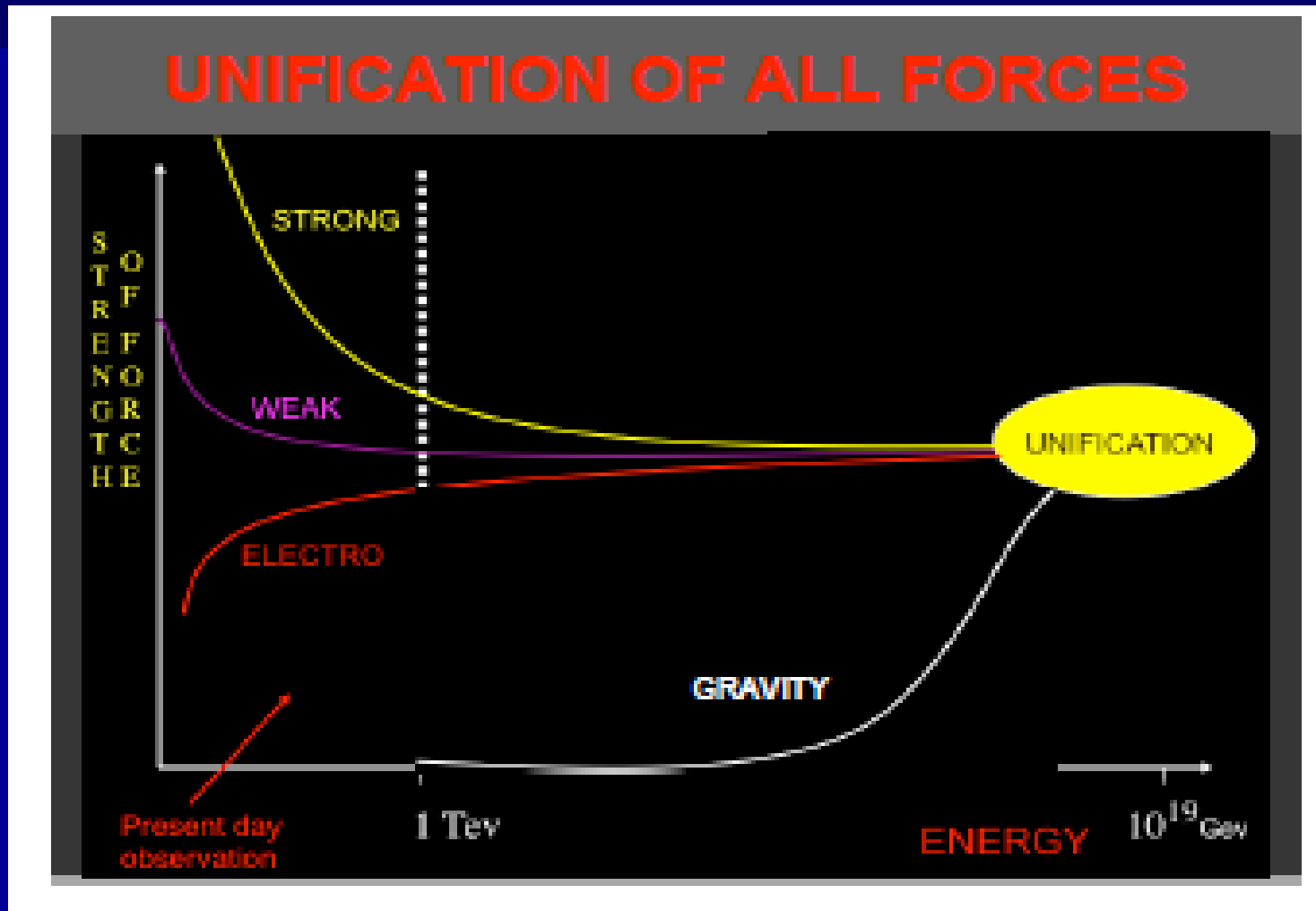


- Grawitacja - bardzo słaba dla małych energii (dużych odległości) - wzmacnia się dla dużych energii → „siła” porównywalna do innych oddziaływań dla (masy) energii Plancka. Pełna unifikacja sił?

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

Rozszerzenia Modelu Standardowego

- Rozszerzenie symetrii
→ supersymetria
- Rozszerzenie czasoprzestrzeni
→ dodatkowe wymiary przestrzenne
- Rozszerzenie obiektów
→ rozciągłe obiekty fundamentalne
(struny, membrany i brany p-wymiarowe)

Uwaga - badania nad sub-strukturą w zaniku

Problemy Modelu Standardowego

- Wiele parametrow (np. masy) - w innych 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 !)
 - mamy 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).

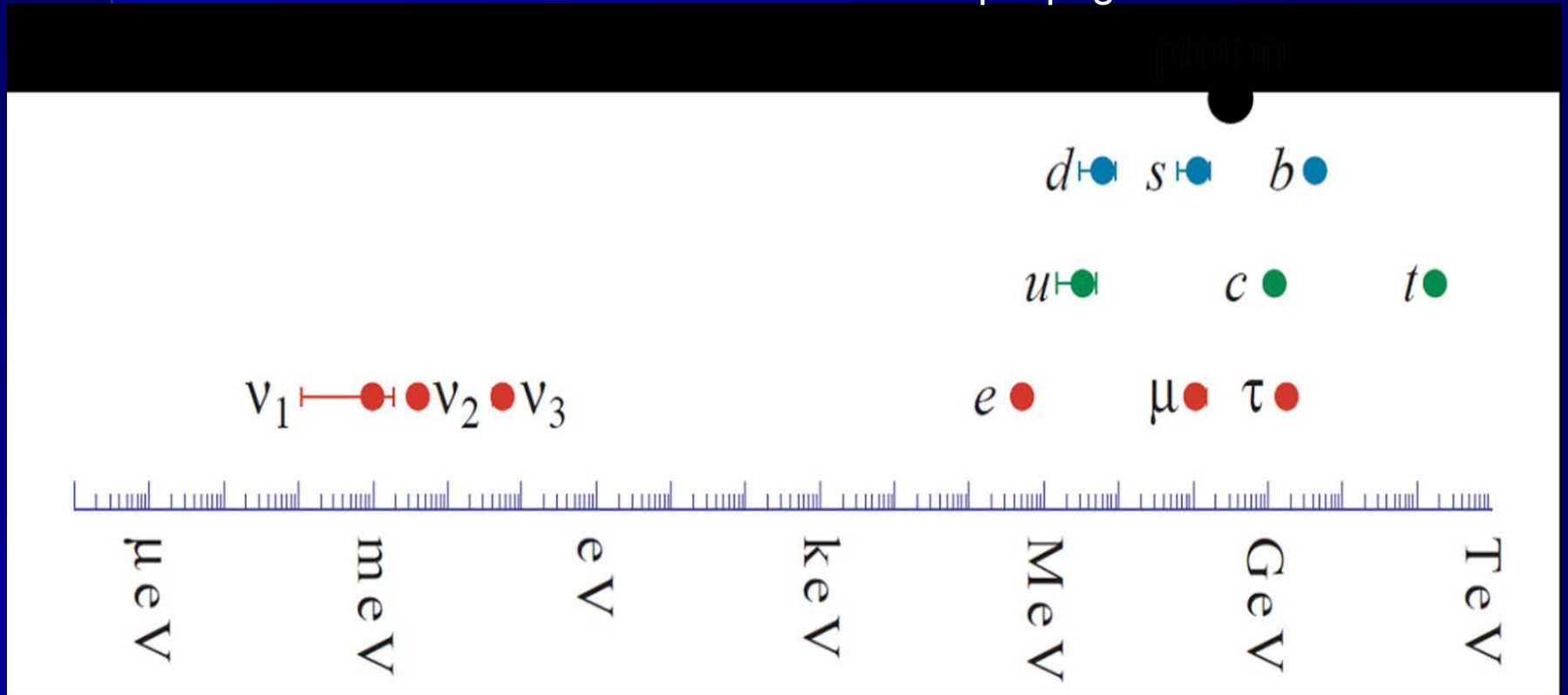
⇒ ograniczenie na masę
neutrino elektronowego:

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

→ 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



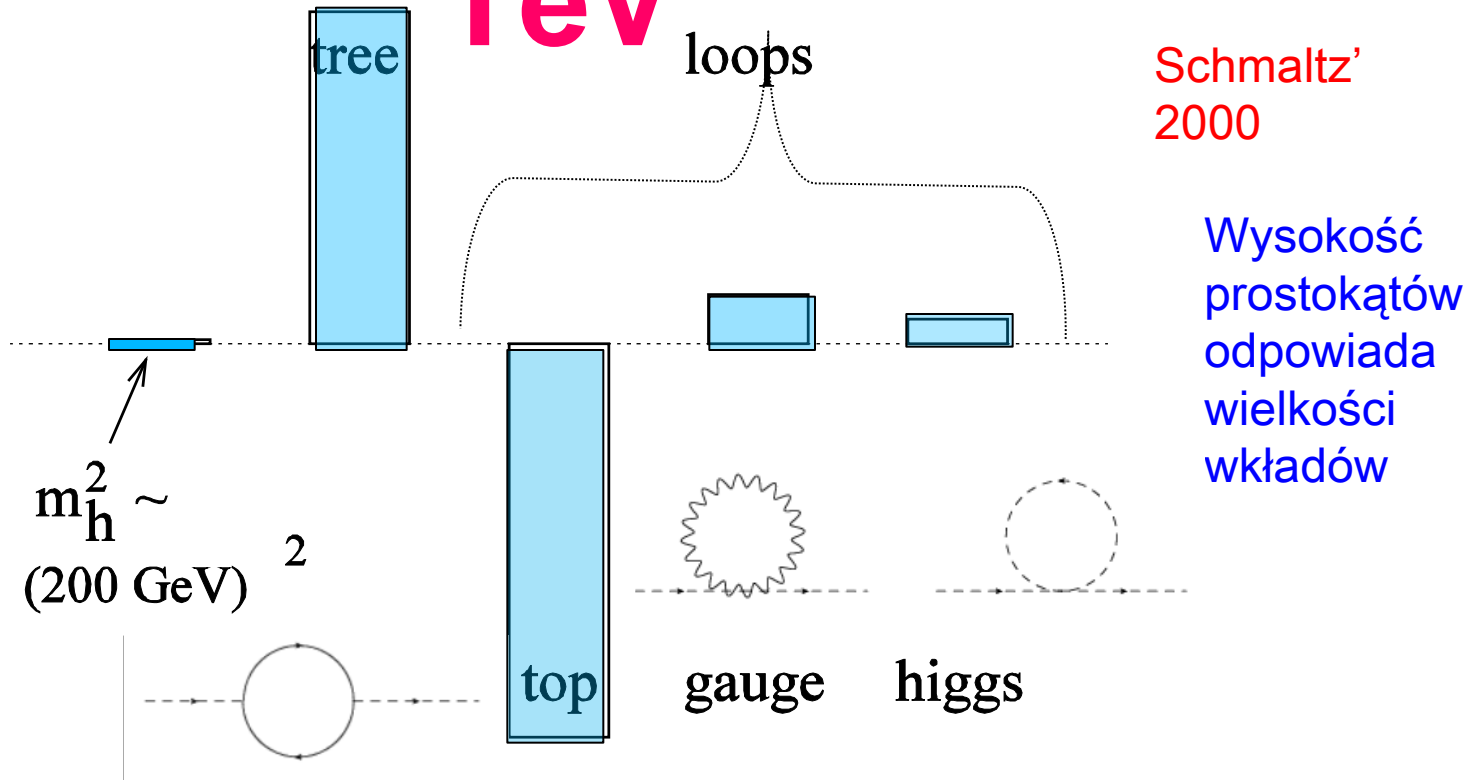
Problem hierarchii w MS

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

Poprawka do masy H ~ sprzężenie $\times \Lambda$

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

„Fine tuning” dla $\Lambda = 10$ TeV



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 precyzyjne skracać z wkładem najniższego rzędu (tree), aby uzyskać przewidywanie na masę cząstki Higgsa około 200 GeV (*precyzyjne dopasowanie*)

Duża różnica skal energii- wymagane niezwykle dokładne dopasowanie parametrów

W LHC energia ok 10 TeV, w Modelu Standardowym dopasowanie $\sim 1/100$ (nienaturalne) \rightarrow oczekiwane efekty „nowej fizyki” (nowe cząstki i oddziaływania)

np.

- skracanie się dużych wkładów w Modelu Supersymetrycznym
- nowe rezonanse z masami rzędu TeV
- więcej wymiarów przestrzennych ...

SUPERSYMETRIA

- W przyrodzie tylko dwa typy cząstek:
fermiony i bozony

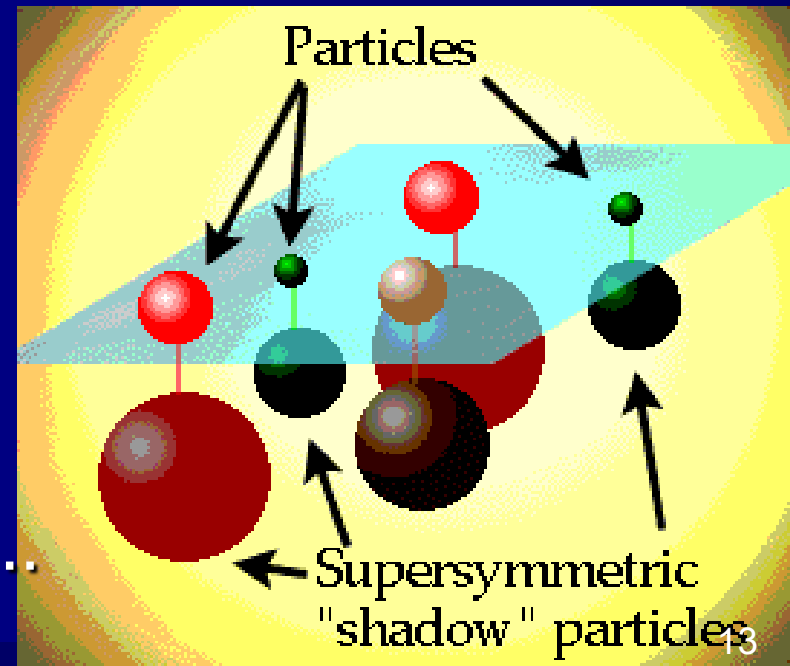
- Supersymetria zakłada symetrię

fermion \leftrightarrow bozon

->wymaga **podwojenia** składu cząstek fundamentalnych

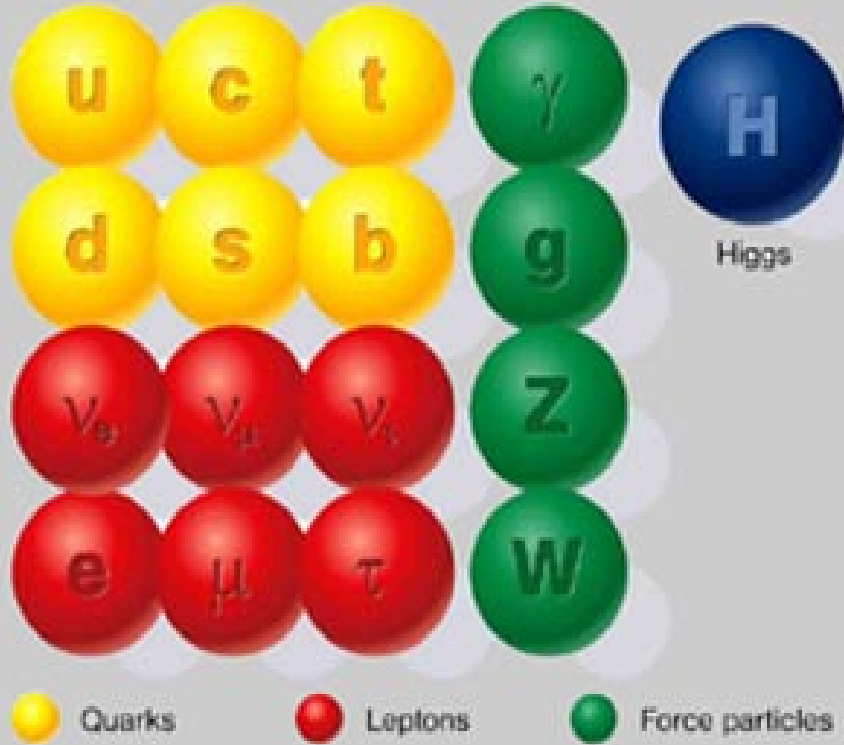
- Supersymetryczni partnerzy znanych cząstek z MS to **cząstki SUSY**.

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

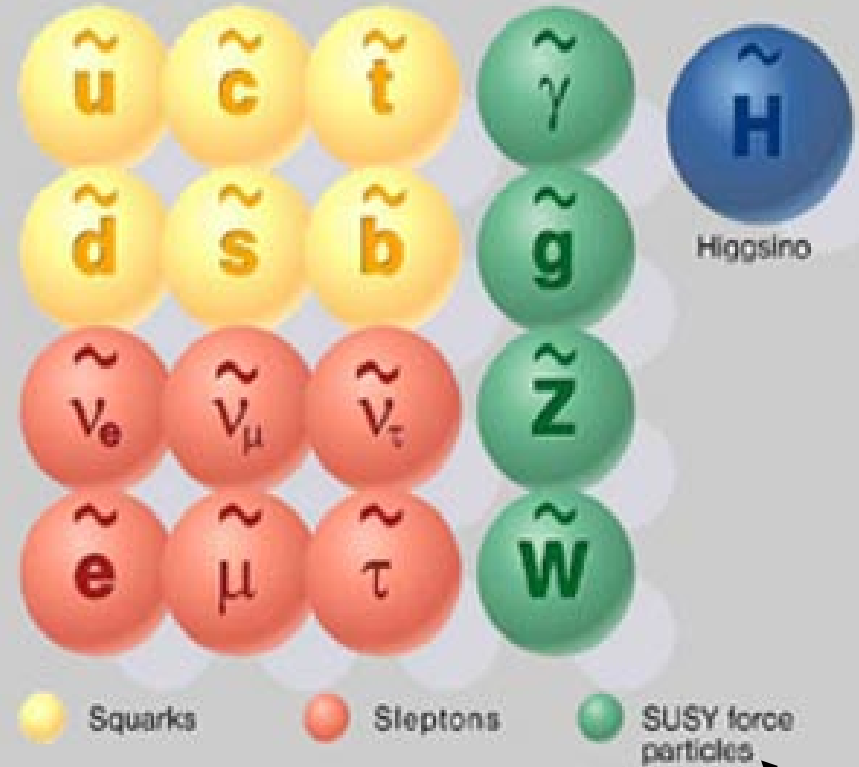


Słodcy partnerzy

Standard particles



SUSY particles



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

Masy ~ 1 TeV

Podwojenie dubletów skalarów Φ_1 i Φ_2 14

Supersymetria jest super

- Problem hierarchii usunięty – kasowanie się wkładów od fermionów i bozonów w pętlach

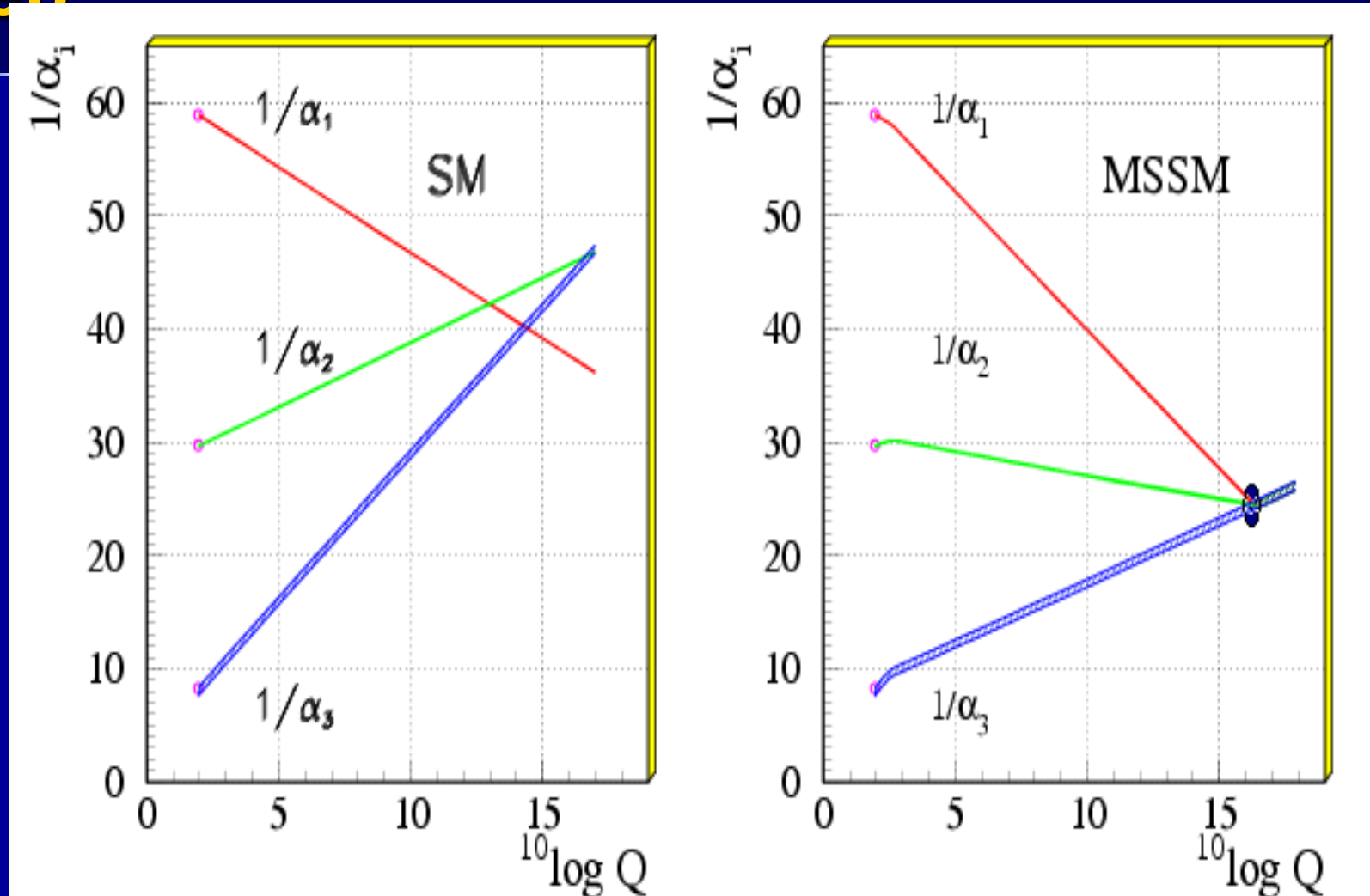


- Unifikacja oddziaływań (GUT): lepsze „zbieganie” stałych sprzężenia do siebie



- Założenie dodatkowe: **symetria R** (liczba kwantowa **R** i jej zachowanie), więc najlżejsza cząstka SUSY jest trwała → kandydat/ka na **ciemną materię**

Unifikacja sił (-> stałe sprzężenia) 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/TeV

Minimalny Standardowy Model Supersymetryczny (MSSM)

- sektor Higgsa

- **Dwa** dublety pól skalarnych \rightarrow aby nadać masę wszystkim cząstkom fundamentalnym
[8 pól skalarnych: 8 – 3 (stany podłużnej polaryzacji dla W^+, W^-, Z) = 5]
- 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 !

MSSM – nowe cząstki (dużo)

W tym:

- **higgsina** spin $\frac{1}{2}$
- **gaugina** spin $\frac{1}{2}$ (*fotino, gluino, wino, zino*)

- higgsina i gaugina mieszają się
→ fizyczne cząstki to:

neutralina (neutralne)

czardżina (naładowane)

LHC 2017- nie znaleziono

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

5 - plet

- 5-plet dla 1-ej generacji

$$\begin{pmatrix} d \\ d \\ d \\ e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}$$

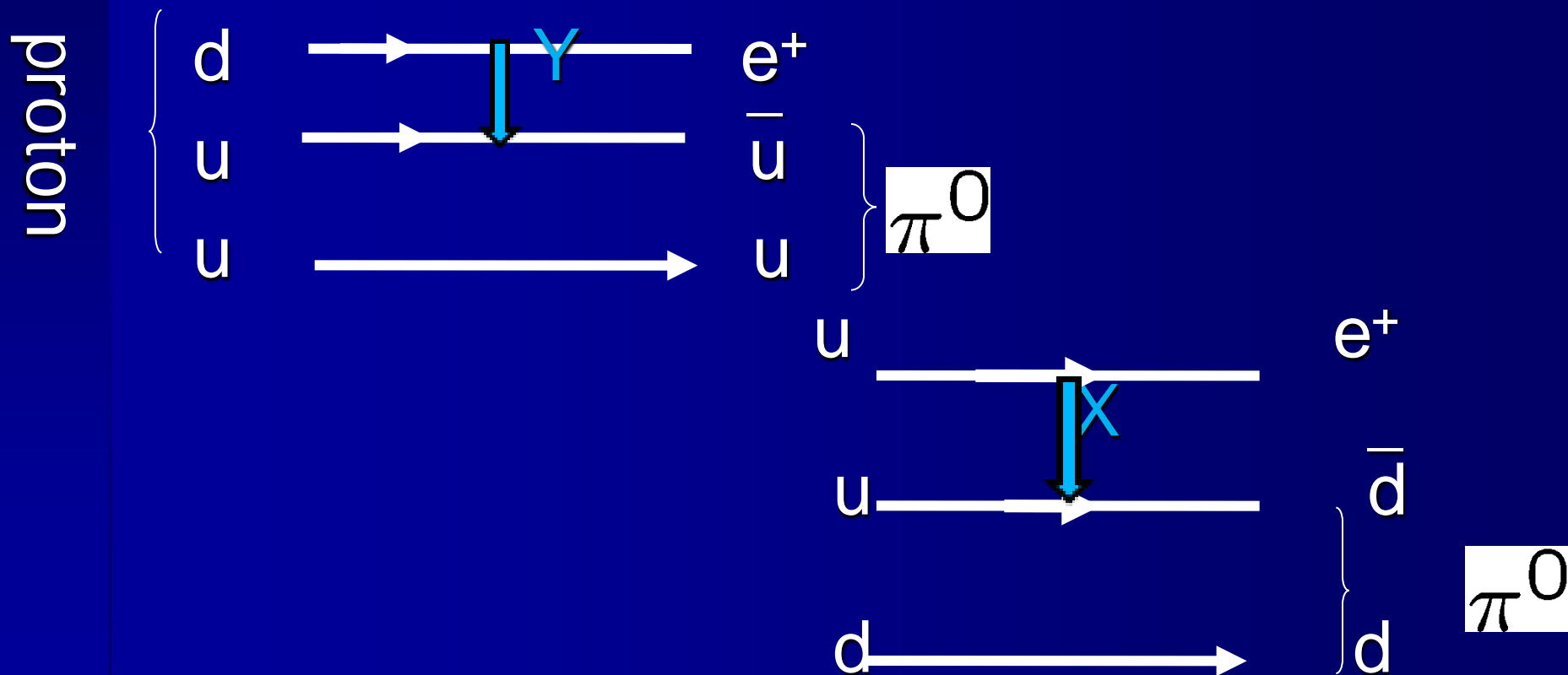


możliwe
przejście
kwark-
pozyton !

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 protonu 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...

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 MS 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

Teoria strun (superstrun)

Teoria strun - idea pojawiła się przy opisie hadronów.

Struny (hadronowe) opisują stany związane kwarków (hadrony) w wyniku oddziaływań silnych



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?

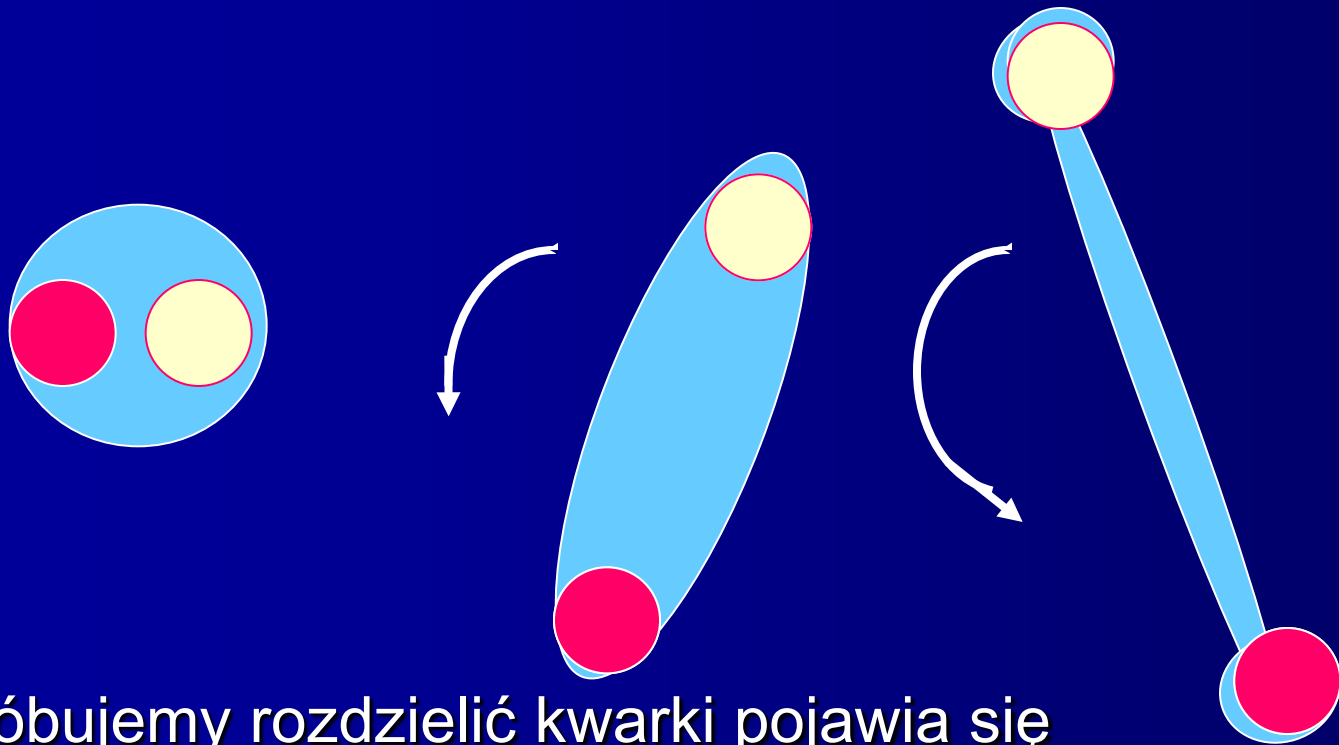
Hadrony = stany związane kwarków

- Kwarki – zawsze na uwięzi, nigdy swobodne, a wiązania zupełnie inne niż w atomie lub jądrach
- Atom wodoru, jądra at. – w nich energia wiązania mała, więc całkowita energia (masa) bliska sumie energii spoczynkowych (mas) składników,
 - atom wodoru:
masa $e = 0.511 \text{ MeV}$, masa $p = 938.272 \text{ MeV}$, en. wiązania -13.6 eV
 - jądro helu ($2p\ 2n$): masa 3755.67 MeV , en. wiązania -28 MeV
→ łatwo (stosunkowo) można rozdzielić składniki
- W hadronach kwarki zanurzone w **cieście gluonowym o własnościach gumy do żucia**: np. w protonie masy kwarków u i d to razem $\sim 15 \text{ MeV}$, zaś masa $p = 938 \text{ MeV}$. Reszta energii spoczynkowej protonu jest zawarta w energii oddziaływania gluonów z kwarkami i ze sobą (gluony nie mają masy spoczynkowej).
- Kwarków nie można łatwo rozdzielić, przy takiej próbie napina się struna gluonowa między kwarkami, które chcemy rozdzielić, a energia wiązania rośnie wraz ze zwiększeniem odległości między kwarkami (jak przy rozciąganiu gumy). Struna może pęknąć - wtedy powstają dwie struny z kwarkami na końcu każdej struny



Hadrony i struna gluonowa

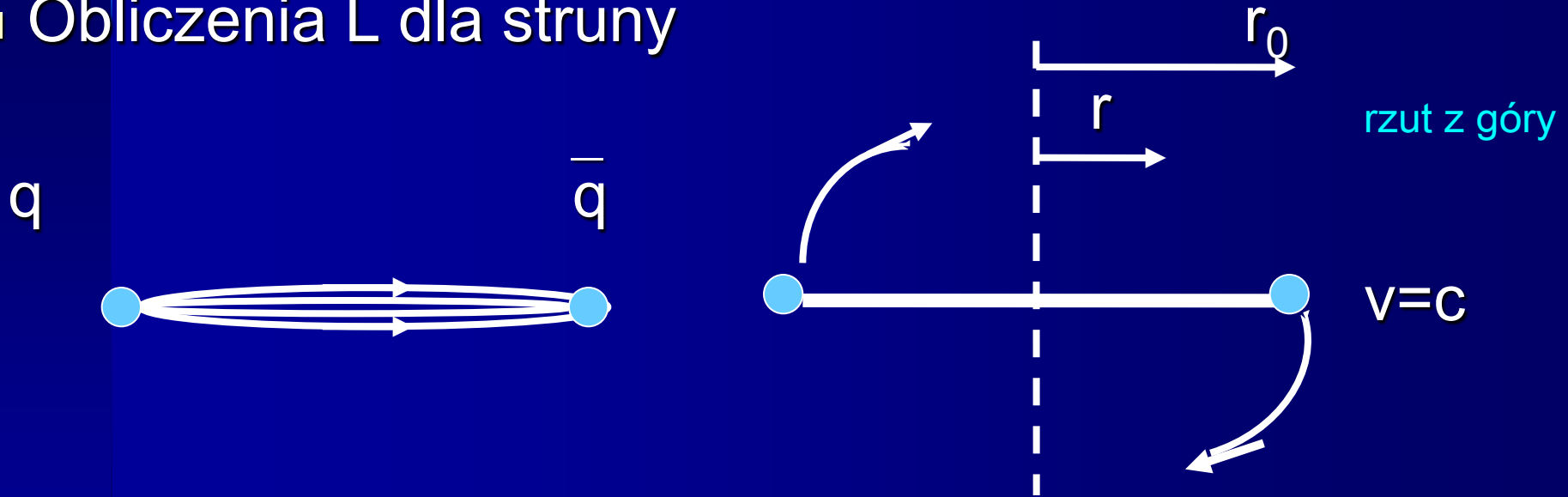
- Pole gluonowe wewnątrz hadronów



- Gdy próbujemy rozdzielić kwarki pojawia się struna gluonowa, możliwe też obroty kwarków wokół siebie → stany wzbudzone: wyższe energie (= masy) i spiny

Spin hadronu = całkowity moment pędu struny

- Całkowity moment pędu \mathbf{J} = orbitalny moment pędu L + wewnętrzny moment pędu (spin kwarków)
- Obliczenia L dla struny



Dla struny otrzymuje się zależność: $\mathbf{J} = \alpha' E^2 + \text{const}$ ($E^2 \sim m^2$)

Nachylenie $\alpha' = 1/(2\pi k\hbar c)$

Dośw. $\alpha' = 0.93 \text{ GeV}^{-2} \rightarrow$ gęstość energii $k = 0.87 \text{ GeV fm}^{-1}$

Spektra hadronów

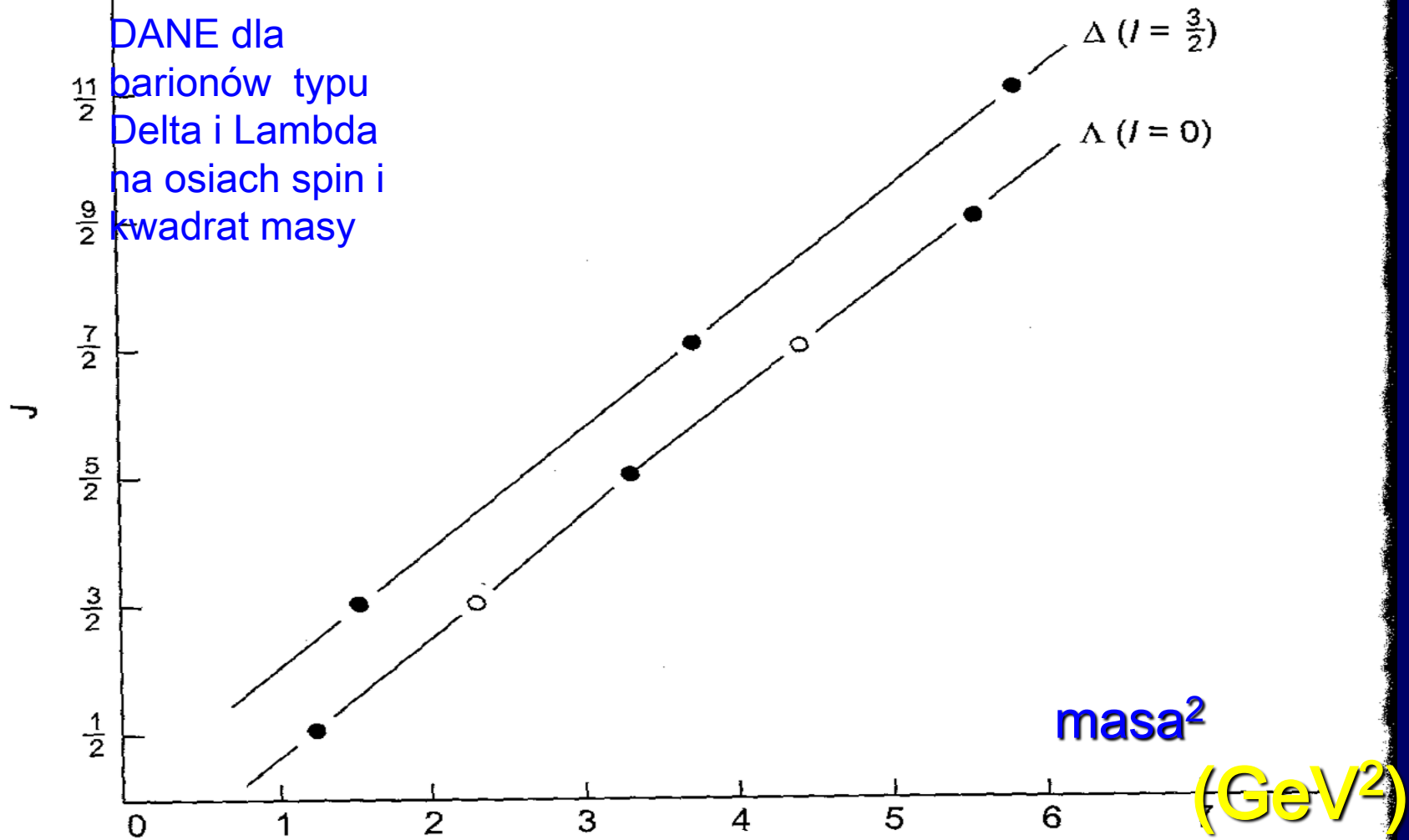
→ trajektorie Regge'go

Model struny → liniowy związek między kwadratami mas i spinami cząstek, obserwowany w świecie hadronów zarówno

dla mezonów jak i dla barionów

Liniowy związek → trajektorie Regge'go dla grup hadronów mających takie same liczby kwantowe ale różniących się masą i spinem

Trajektorie Reggego $J=J_0+\alpha'm^2$ przykład dla barionów (izospin 3/2 i 0)



Superstruny

- Teoria Wszystkiego (Theory of Everything) połączenie wszystkich oddziaływań wraz z grawitacją. W kwantowej teorii pola – oddziaływania są 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 α' - 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

D.Gross

- 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 dośw. ?
- 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?