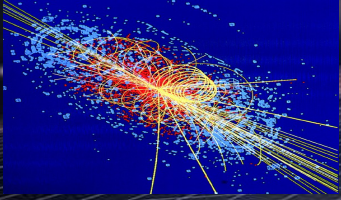


Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 13

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW


19.V. 2010

Hadrony i struny gluonowe

Model Standardowy AD 2010

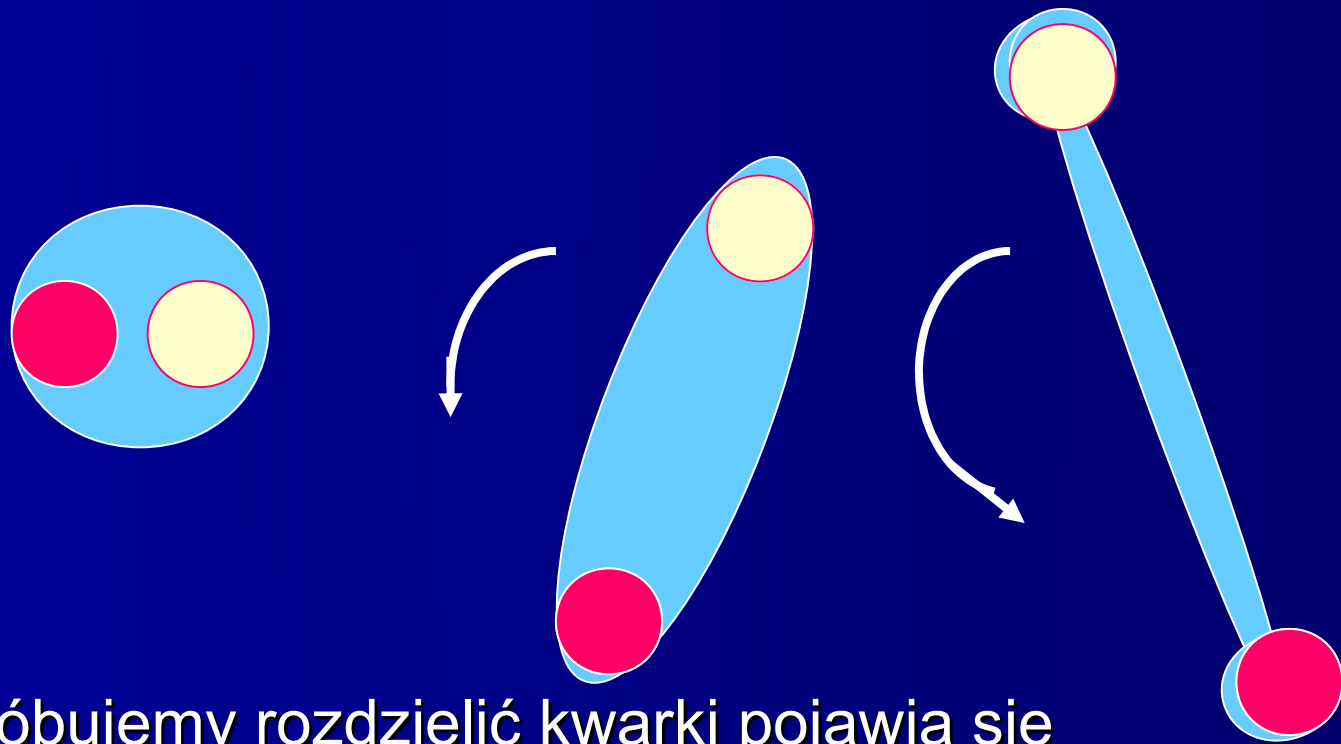
Poza Modelem Standardowym

Hadrony = stany związane kwarków

- Kwarki – zawsze na uwiezi, nigdy swobodne. Ale 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 ($2 p 2n$): 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 około 15 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).
- 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, 

Struna gluonowa

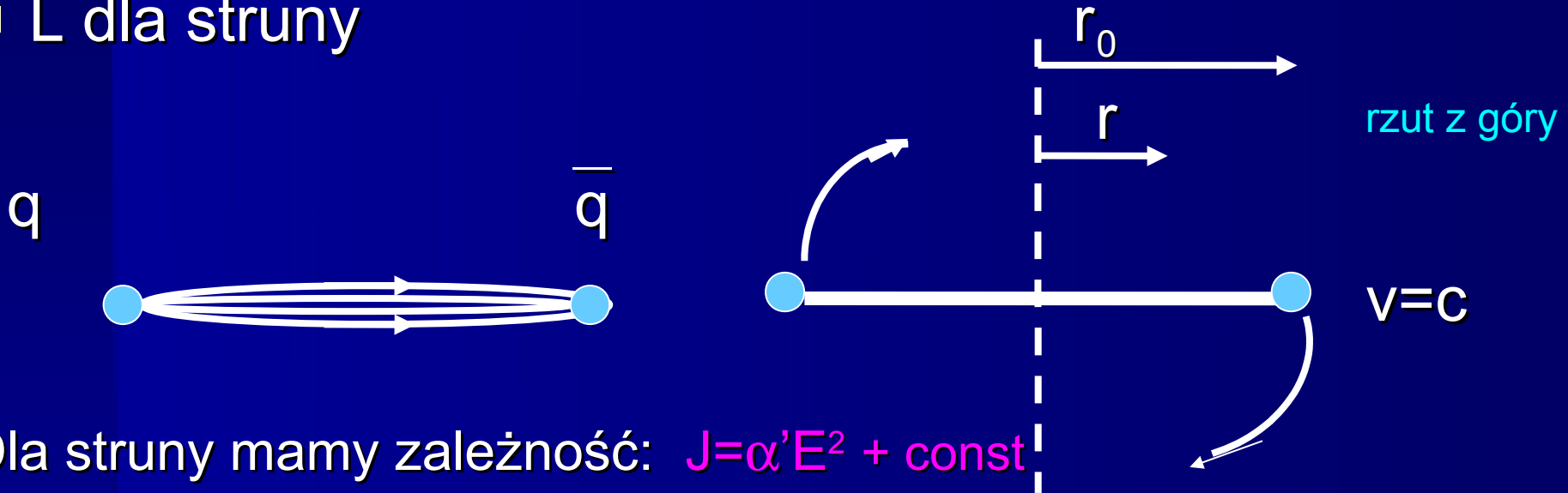
- Pole gluonowe wewnątrz hadronów



- 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)
- L dla struny



Dla struny mamy zależność: $\mathbf{J} = \alpha' E^2 + \text{const}$

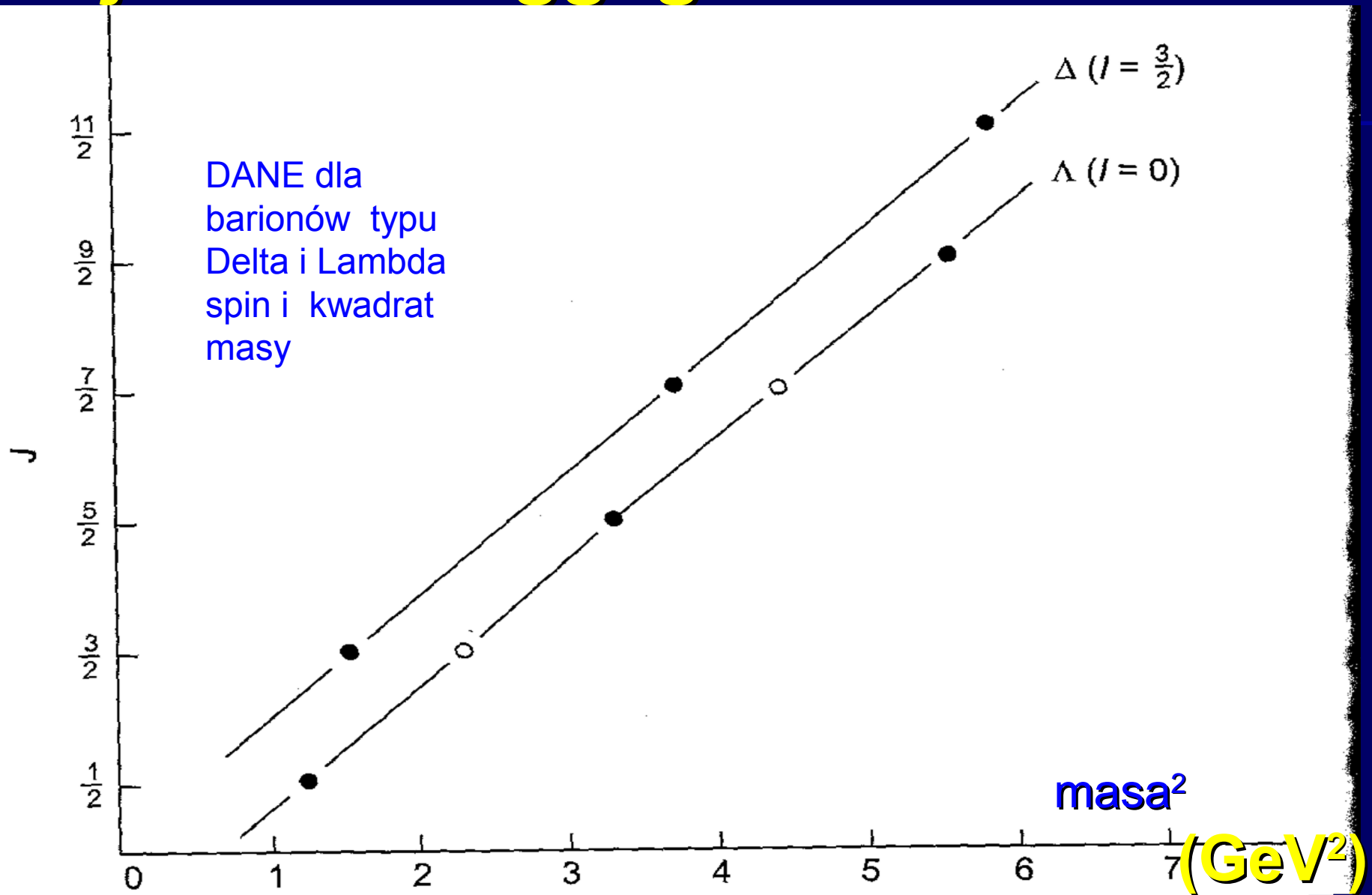
Nachylenie $\alpha' = 1/2\pi k \hbar c$

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

(Oszacowanie np. dla protonu:

masa $1 \text{ GeV}/c^2$, promień 1 fm , stąd gęstość energii $k = 1 \text{ GeV fm}^{-1}$)

Trajektorie Reggego $J=J_0+\alpha'm^2$



Hadrony: Pytania i odpowiedzi

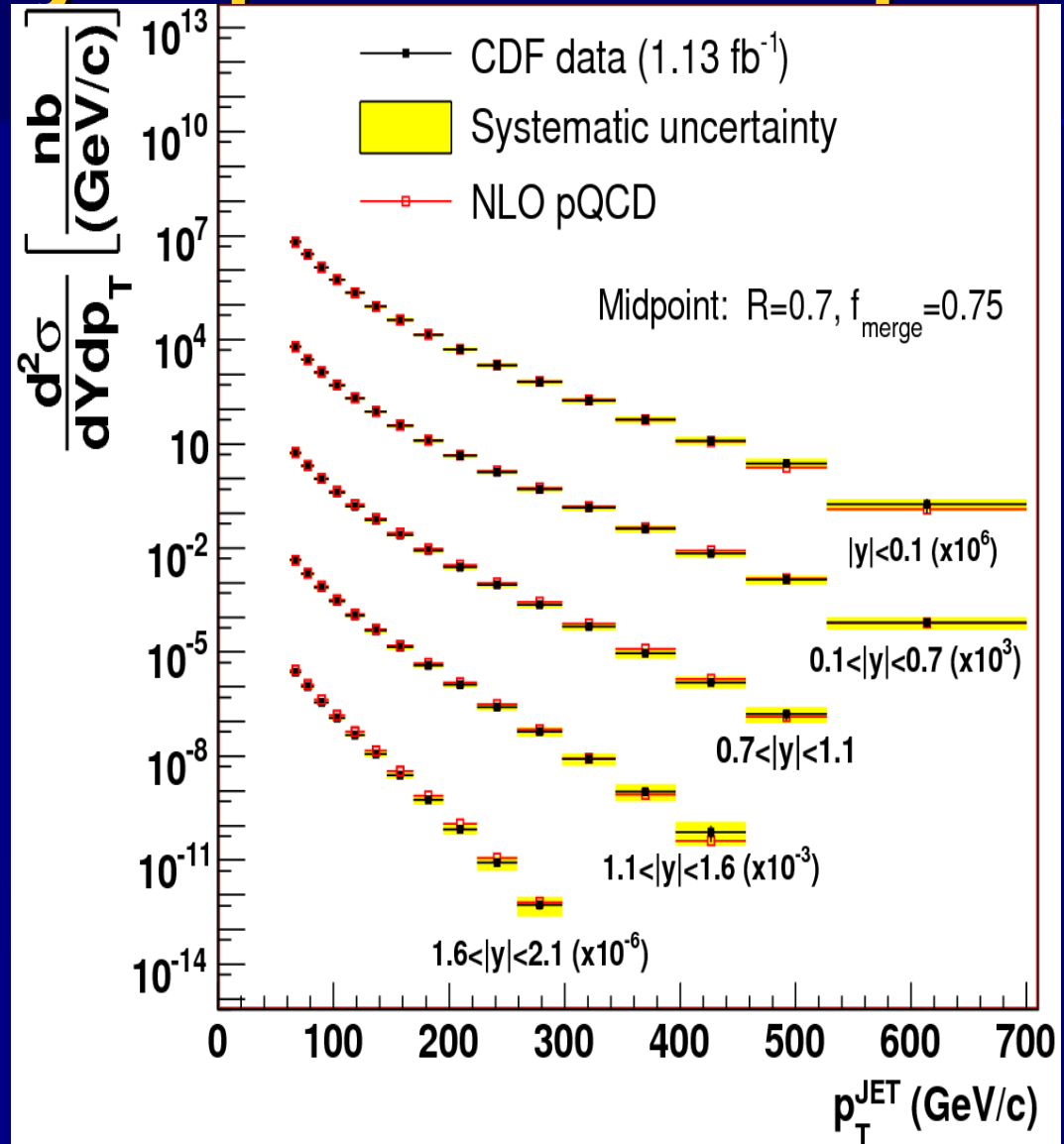
- Czy istnieją **glubole** – hadrony składające się z samych samych gluonów? Być może..
- Gluony bezmasowe a oddziaływanie krótkozasięgowe - jak to możliwe? Nieskończona energia potrzebna, aby oddzielić części układu hadronowego.
- Fizyczne cząstki muszą być kolorowo neutralne i nie ma długo zasięgowych sił kolorowych, tzn. że pole gluonowe jest wygaszone
- Opis teoretyczny → chromodynamika kwantowa (QCD) dla oddziaływań silnych fundamentalnych (kolorowych). Ale nie wiemy jak obliczyć masę protonu (pionu) jako stanu związanego kwarków
- Wiele potrafimy dzięki **asymptotycznej swobodzie** → dla procesów z dużym przekazem pędu stosuje się rachunek zaburzeń
- **Struny gluonowe** → początek teorii strun

TeVatron: Dżety hadronowe z dużymi pędami poprzecznymi produkowane pod różnymi kątami (parametr y ; $y=0$ to kąt 90°)

Teoria: pQCD
(perturbative QCD)

Znakomita zgodność!

Darren Price –
Latest jet results
from the Tevatron::
Moriond QCD –
March 16th 2010



Model Standardowy AD 2010

- Znakomita zgodność z doświadczeniem dla oddziaływań elektroślabych (choć brak cząstki Higgsa) i silnych (choć nie umiemy wyprowadzić z pierwszych zasad mas hadronów)
- Ale są problemy: np. w sektorze elektroślaby poprawki pętlowe i różne skale energii →
problem hierarchii $M_h \ll M_{pl}$
- Dużo parametrów (masy, stałe sprzężenia, kąty mieszania)
- Niezerowa masa neutrin..
- 3 rodziny - dlaczego?
- Brak kandydatki na ciemną materię
- Brak unifikacji oddziaływań elektroślabych z silnymi.., z grawitacją..

Poza Modelem Standardowym

→ dążenie do unifikacji

- **Model Standardowy: symetria cechowania**
 $SU(2) \times U(1) \times SU(3)_c$
EW: $SU(2) \times U(1) \rightarrow$ częściowa unifikacja sił słabych i e-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 grawitacji – naturalną skalą jest skala Plancka
masa Plancka **1.2×10^{19} GeV**
długość Plancka 1.6×10^{-35} m

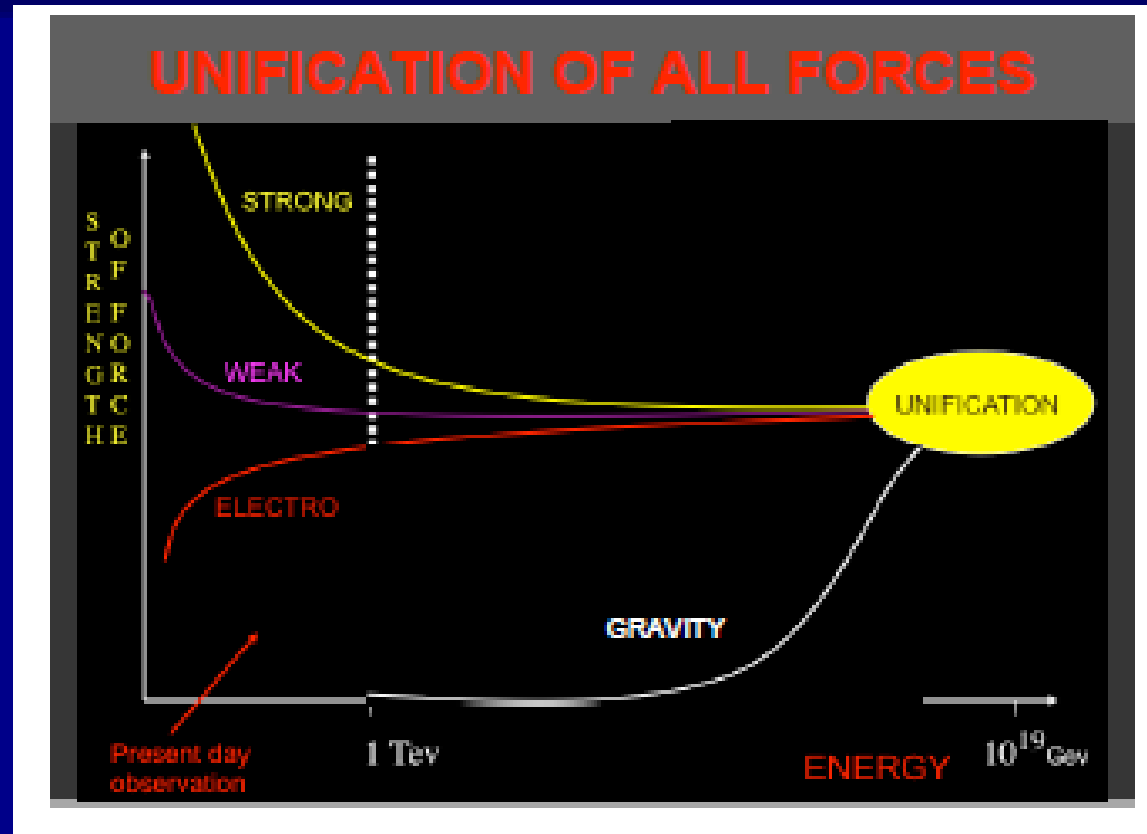
Unifikacja z grawitacją?

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

Unifikacja z grawitacją

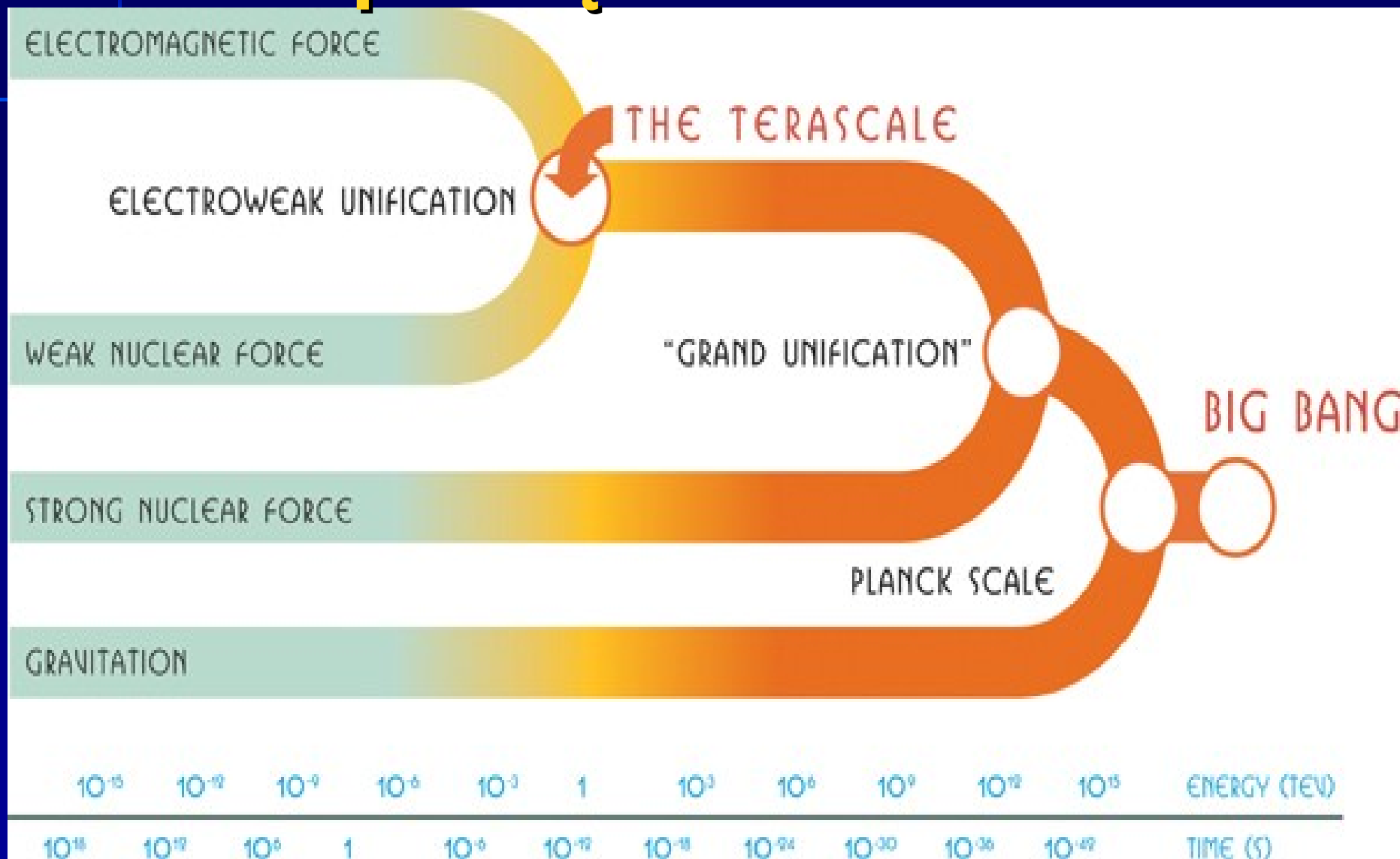
David Gross: The Coming Revolutions in Theoretical Physics

<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 gr. opisuje prawo Newtona
Einstein w 1915-17: oddziaływanie grawitacyjne
powiązał z dynamiką czasoprzestrzeni

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

Trzeba wyjść poza teorię Einsteina, np. teoria strun.
Struny powstały aby opisać oddz. silne → a okazuje
się, że grawitacja pojawia się automatycznie

Spójna i skończona (bez nieskończoności) kwantowa
teoria grawitacji

Kierunki badań

1/ Rozszerzenie symetrii
→ supersymetria

2/ Rozszerzenie czasoprzestrzeni
→ dodatkowe wymiary przestrzenne

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

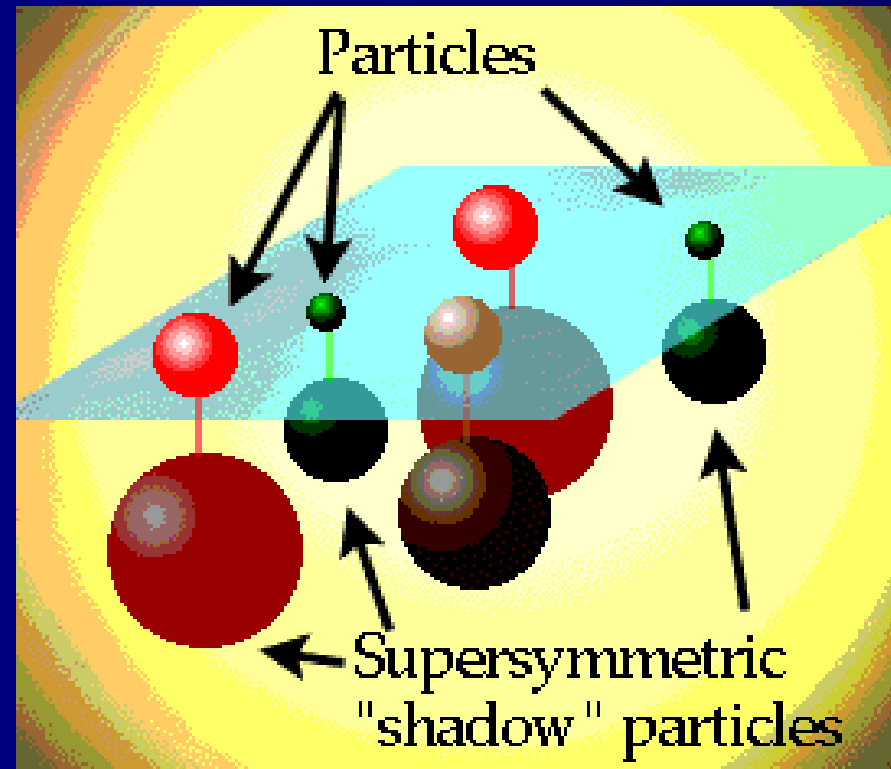
Ku **Teorii Wszystkiego**-
pełna unifikacja wszystkich oddziaływań
fundamentalnych i renormalizowalność

Uwaga- badania nad substrukturą w zaniku

SUPERSYMETRIA

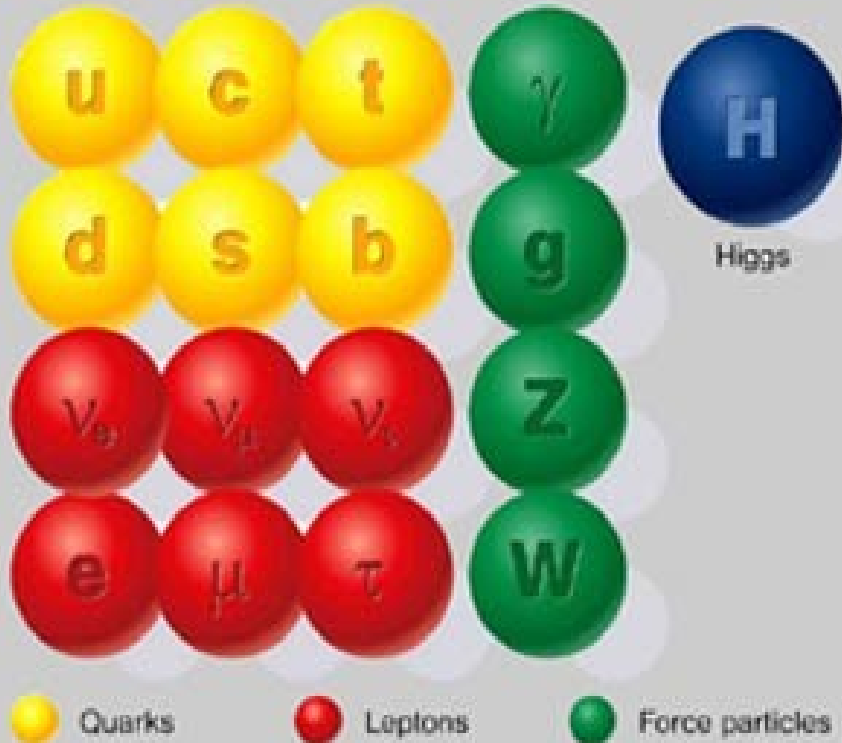
- W przyrodzie dwa typy cząstek: fermiony i bozony
- Supersymetria zakłada symetrię fermion \leftrightarrow bozon, czyli podwojenie składu cząstek
- Supersymetryczni partnerzy znanych cząstek z MS = cząstki SUSY

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

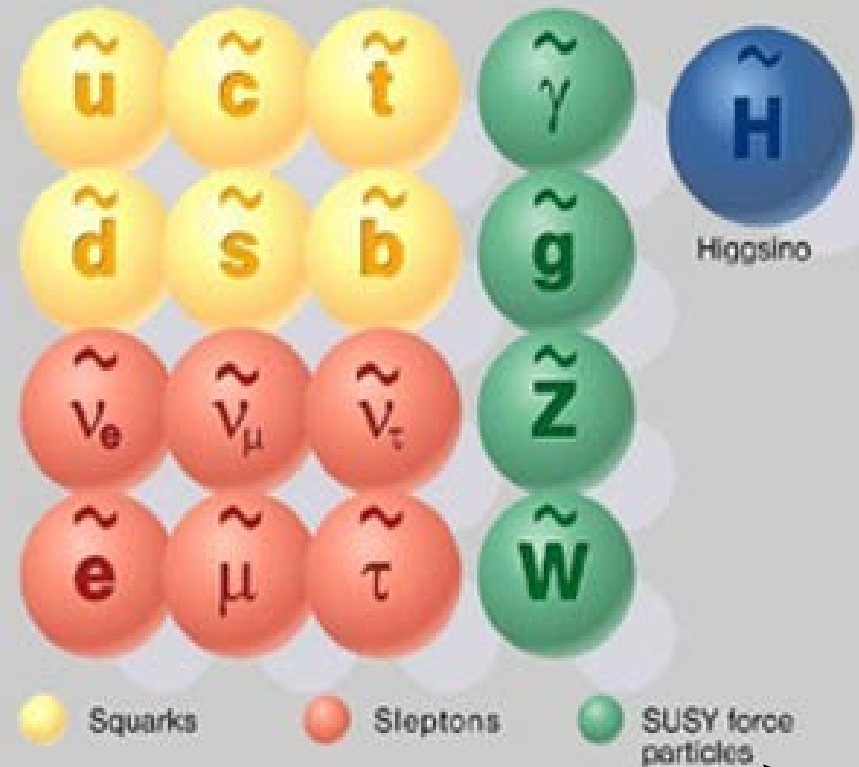


Słodcy partnerzy

Standard particles



SUSY particles



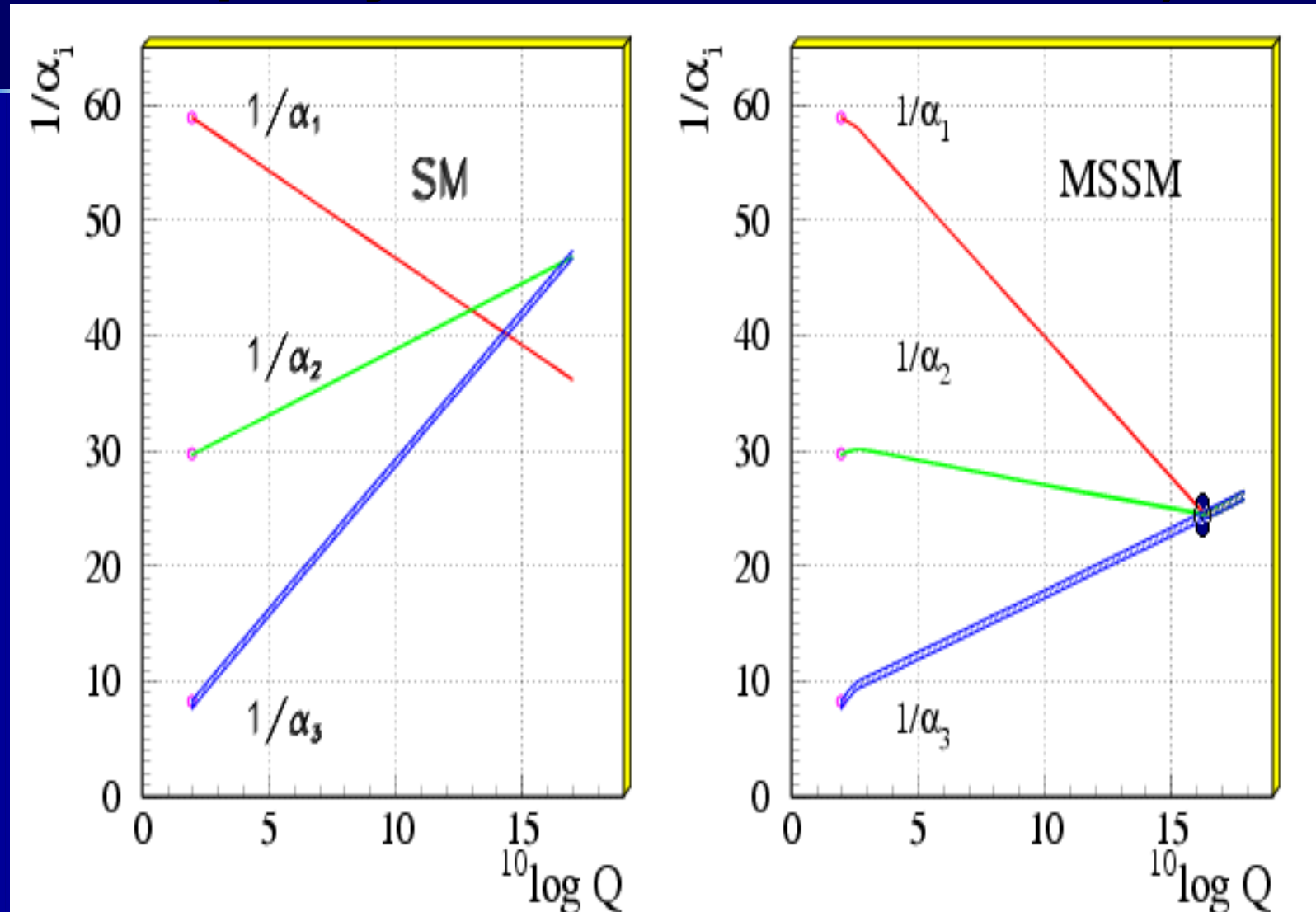
skwarki, sleptony, gaugina, higgsina
spin 0, spin 1/2

Masy ~ 1 TeV

Supersymetria jest super

- Problem hierarchii usunięty – kasowanie się wkładów od fermionów i bozonów w pętlach
- Unifikacja oddziaływań: lepsze „zbieganie” stałych sprzężenia
- Zał. nowa liczba kwantowa **R** i jej zachowanie, więc najlżejsza cząstka SUSY jest trwała → kandydat/tka na **ciemną materię**

Unifikacja sił (SM=Standard Model i MSSM = Minimal Supersymmetric Standard Model)



SUPERSYMETRIA

wg D. Grossa

Odkrycie supersymetrii -
to jak odkrycie kwantowych wymiarów
czaso-przestrzeni

Naturalne i unikatowe rozszerzenie
relatywistycznych symetrii natury

Minimalny Standardowy Model Supersymetryczny MSSM

- sektor Higgsa

- Dwa dublety pól skalarnych \rightarrow aby nadać masy wszystkim cząstkom fundamentalnym. Przewidywanie 5 cząstek Higgsa (spin zero): h, H, A i H^\pm (h jak w SM)

Higgsina o spinie $\frac{1}{2}$

Gaugina (gaudżina, spin $\frac{1}{2}$: *fotino, gluino, wino, zino*) mieszają się z higgsinami

\rightarrow fizyczne cząstki:

neutralina (neutralne) i czardżina (naładowane)

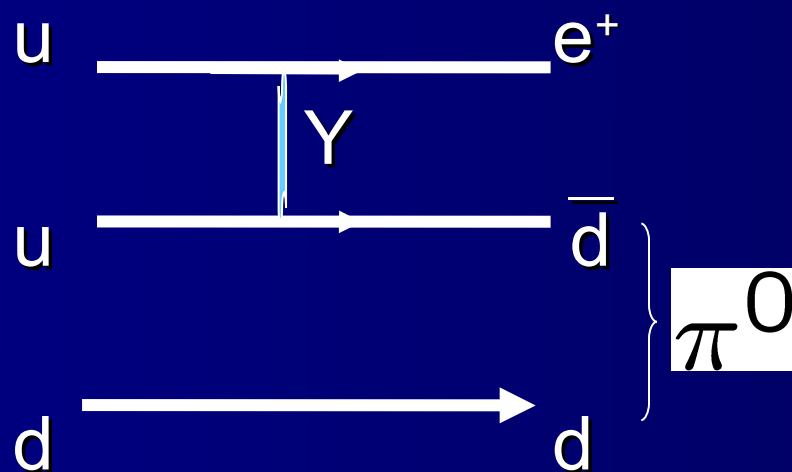
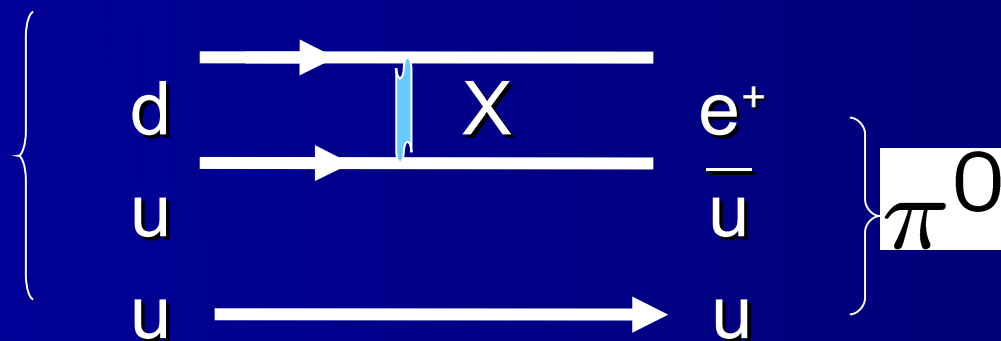
Teoria Wielkiej Unifikacji: SU(5)

- Symetria cechowania SU(5) (zawiera SU(2)xU(1)xSU(3) jako podgrupę) – idea w 1974 r
Glashow, Georgi
- W multipletach zarówno kwarki jak i leptony -
możliwość zamiany kwarków w leptony i odwrotnie
- 12 kolorowych bozonów cechowania:
X (ład. el. $-1/3 e$) i Y ($-4/3 e$)
plus gluony, foton, W/Z = 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;
również leptokwarki występują X, Y
- Skwantowanie ładunku el.; ład. el. $e^- = -$ ład. el. p
- Ale proton się rozpada w wyniku wymiany bozonów X i Y za szybko: czas życia 10^{30-31} lat (dane $> 10^{31-33}$ lat)

Rozpad protonu $p \rightarrow e^+ \pi^0$

Przykłady procesów z wymianą X i Y

proton



KALUZA-KLEIN THEORY

D.Gross



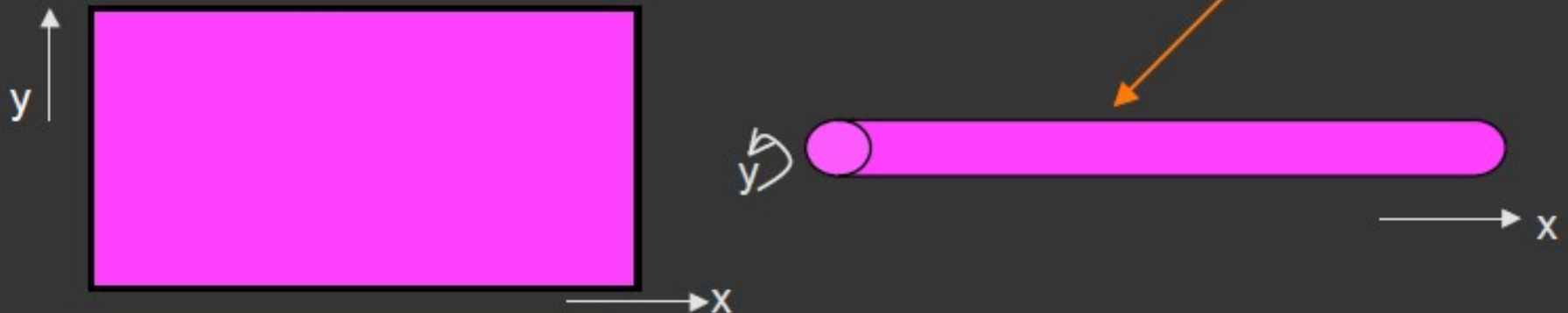
(1919-21) If space-time is dynamical there might exist new, curled up, spatial dimensions.

Jeśli czaso-przestrzeń jest dynamiczna mogą istnieć nowe, zwinięte, wymiary przestrzenne
To może wyjaśnić oddziaływania e-m 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



Superstruny

- Przykład Teorii Wszystkiego (Theory of Everything) – połączenie wszystkich oddziaływań wraz z grawitacją. W kwantowej grawitacji – oddziaływania punktowe, a to prowadzi do osobliwości (nieskończonych wyrażeń)
- Zastępujemy cząstki punktowe **strunami o skończonej długości**
- W grawitacji – skala Plancka
 $l_{Pl}=1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$, $M_{Pl}=1.2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$
- Cząstki – zamknięte pętle i różne wzbudzenia strun → różne cząstki fundamentalne.
- **Teoria renormalizowalna w przestrzeni o wymiarach 10 lub więcej**
- Parametr opisujący struny α' - ten sam co w oddziaływaniach hadronów !
- Superstruny – wciąż brak konkretnych przewidywań

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

Veltman:

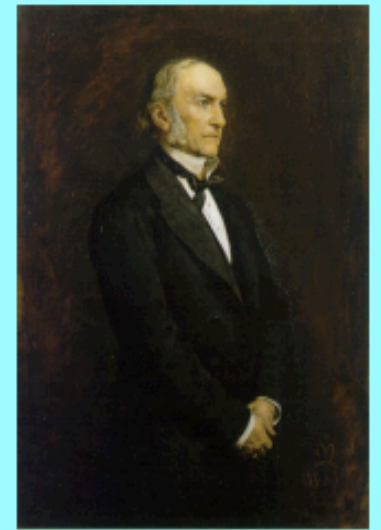
this book is about a physics, and this implies that the theoretical ideas discussed must be supported by experimental facts. Neither supersymmetry nor string theory satisfy this criterion. They are figments of the theoretical mind.

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

They have no place here.



Michael Faraday
(1791 – 1858)

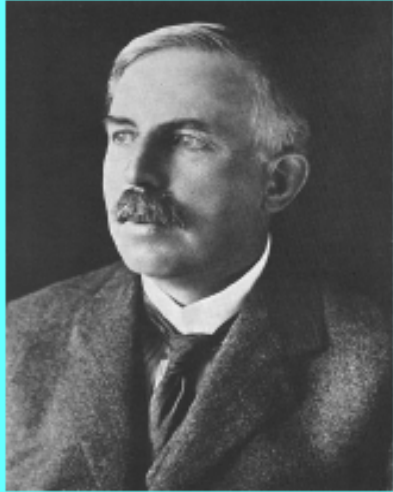


William Gladstone
(British politician –
future Prime Minister)

G: *What use is electricity?*

F: *One day Sir you may tax it.*

*Taken from Ch.Llewellyn Smith,
The use of basic science*



Ernest Rutherford discovered atomic nuclei (1911)

„Anyone who expects a source of power from the transformation of atoms is talking moonshine”



Robert R. Wilson

– first Director of Fermilab in Batavia

Congressional Committee:

What will your lab contribute to the defense of the US?

Wilson:

Nothing, but it will make it worth defending.

NIE MA NIC BARDZIEJ
UŻYTECZNEGO
NIŻ DOBRA TEORIA

L. Boltzmann

(Lewin, Popper, Einstein..)

Pytania do wykładu 13

Ile wynosi gęstość energii na 1 fm dla struny gluonowej?

Co to są glubole?

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 superymetria została odkryta?

Ile cząstek Higgsa przewiduje MSSM?

Czy proton jest stabilny w teorii cechowania SU(5)?

Czy istnieją teorie zakładające różną od 4 liczbę wymiarów?

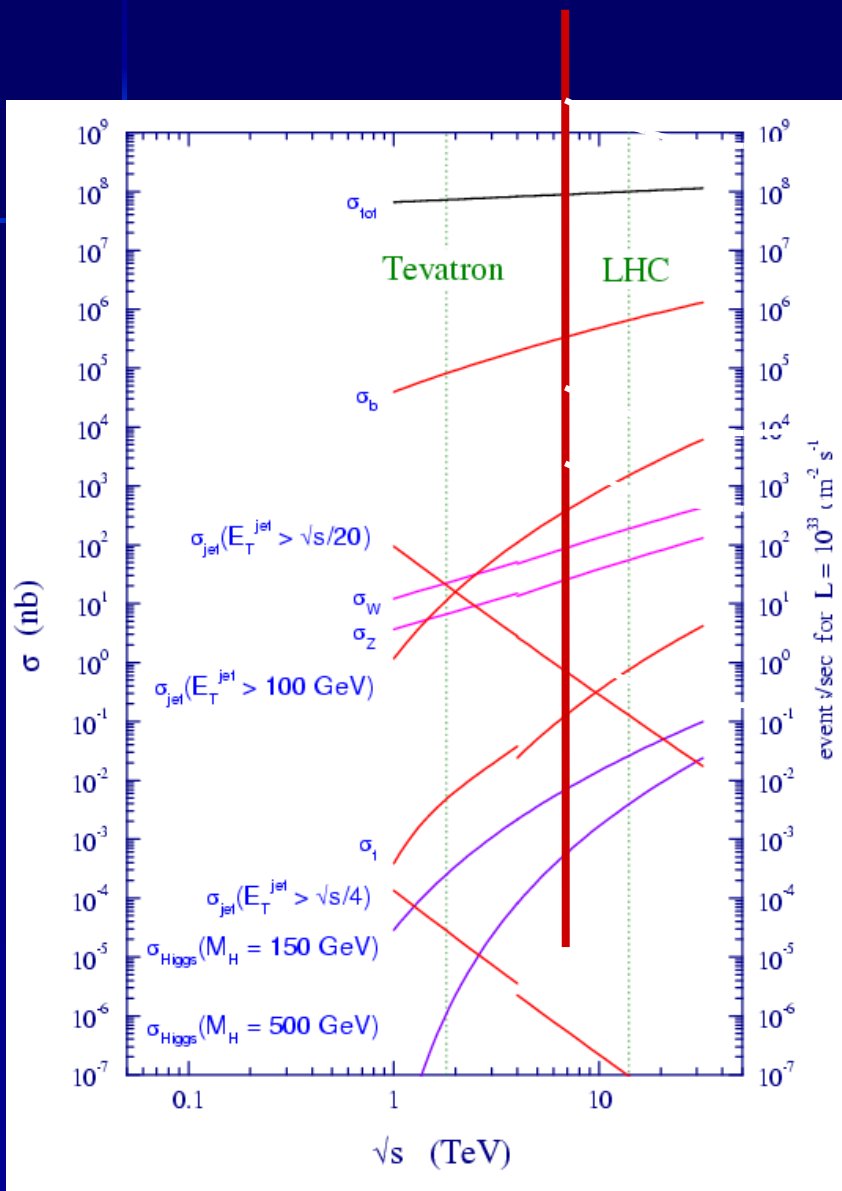
Jaka jest główna idea teorii superstrun?

Czy teoria superstrun uwzględnia grawitację?

Czy teoria superstrun jest renormalizowalna?



Cross section and events rate 14 TeV



Total inelastic

□ ~ 80mb

Inclusive jet
Production $E_T > 100$ GeV

□ ~ few μ b

Inclusive Z (W)

□ ~ 40(140) nb

Higgs $m_H = 150$ GeV

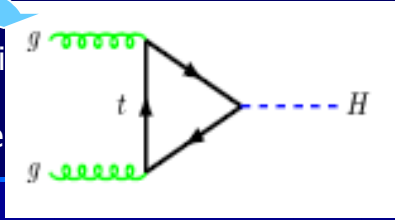
□ ~ 30 pb

The H signal production cross section is several orders of magnitude below the main processes

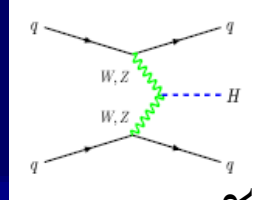
Higgs production and decays of SM Higgs at

Higgs main production mechanisms in order of importance

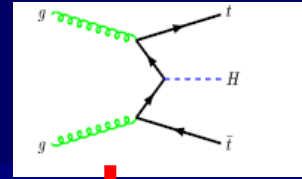
$gg \rightarrow H$ via top quark loop



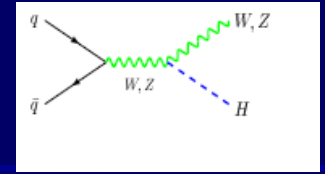
Vector Boson Fusion



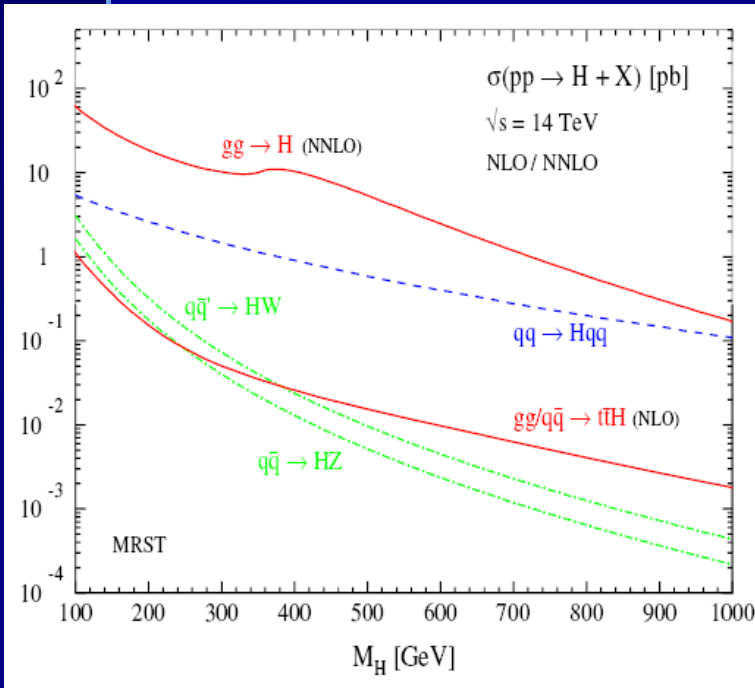
Associated production with top



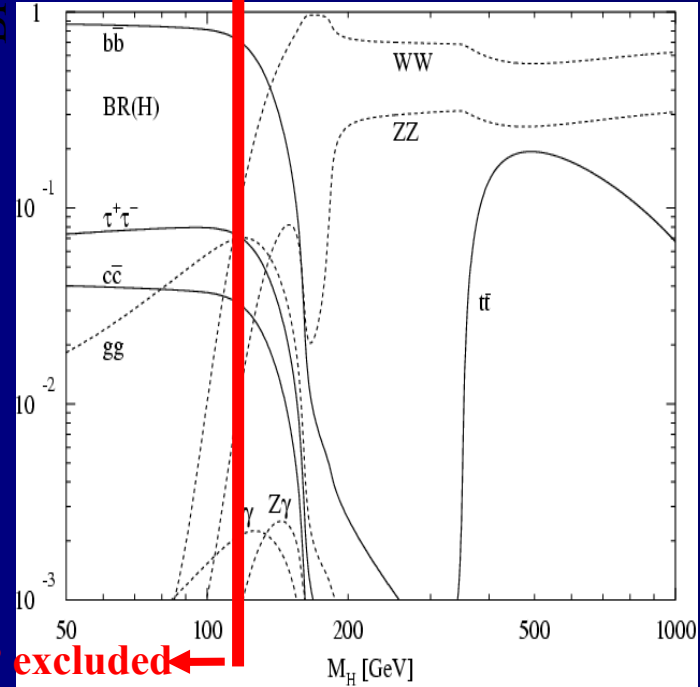
WH, ZH production



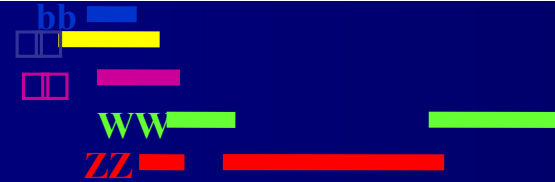
σ (pb)



BR



LEP excluded



Typical uncertainties on the cross sections

gg fusion:	~10-20 %	NNLO
VBF	: ~ 5%	NLO
ttH	: ~10 %	NLO
WH,ZH	: ~ 5%	NNLO

NLO computations for all the relevant BR
Accuracy ~ few %