

Wszechświat cząstek elementarnych

WYKŁAD 11

6.05.2009

Konieczność istnienia cząstki Higgsa
Supersymetria
Więcej wymiarów

The background of the slide is a dark, starry space. A blue grid, representing spacetime, is overlaid on the image. A bright, colorful explosion of particle tracks, primarily in shades of blue and purple with some yellow and orange, emanates from the bottom center. Two yellow arrows point towards this central explosion, one from the left and one from the right. The text is overlaid on this background.

Wszechświat cząstek elementarnych

WYKŁAD 10

29.05.2009

Prawdopodobieństwo procesów
dla dużych energii
i konieczność istnienia cząstki Higgsa

Teoria relatywistyczna (względności)

- Najbardziej bezpośredni przejaw t. relatywistycznej to czas życia cząstek – dłuższy jeśli cząstka się porusza jest to tzw. dylatacja czasu.

Podobny efekt - skrócenie (długości) Lorentza

- Rola pomiaru - transf. Lorentza wiąże pomiary w różnych układach odniesienia

Niezmienność relatywistyczna wzg. zmiany układu odniesienia (układy poruszające się ze stałą prędkością)

- Niezmienność relatywistyczna:
obrotowa, przesunięcia w czasie i przestrzeni
- znane wcześniej (przed Einsteinem)
- Prędkość światła stała w układach odniesienia poruszających się ze stałą prędkością względem

Niezmienność Lorentza, niezmienność Poincare

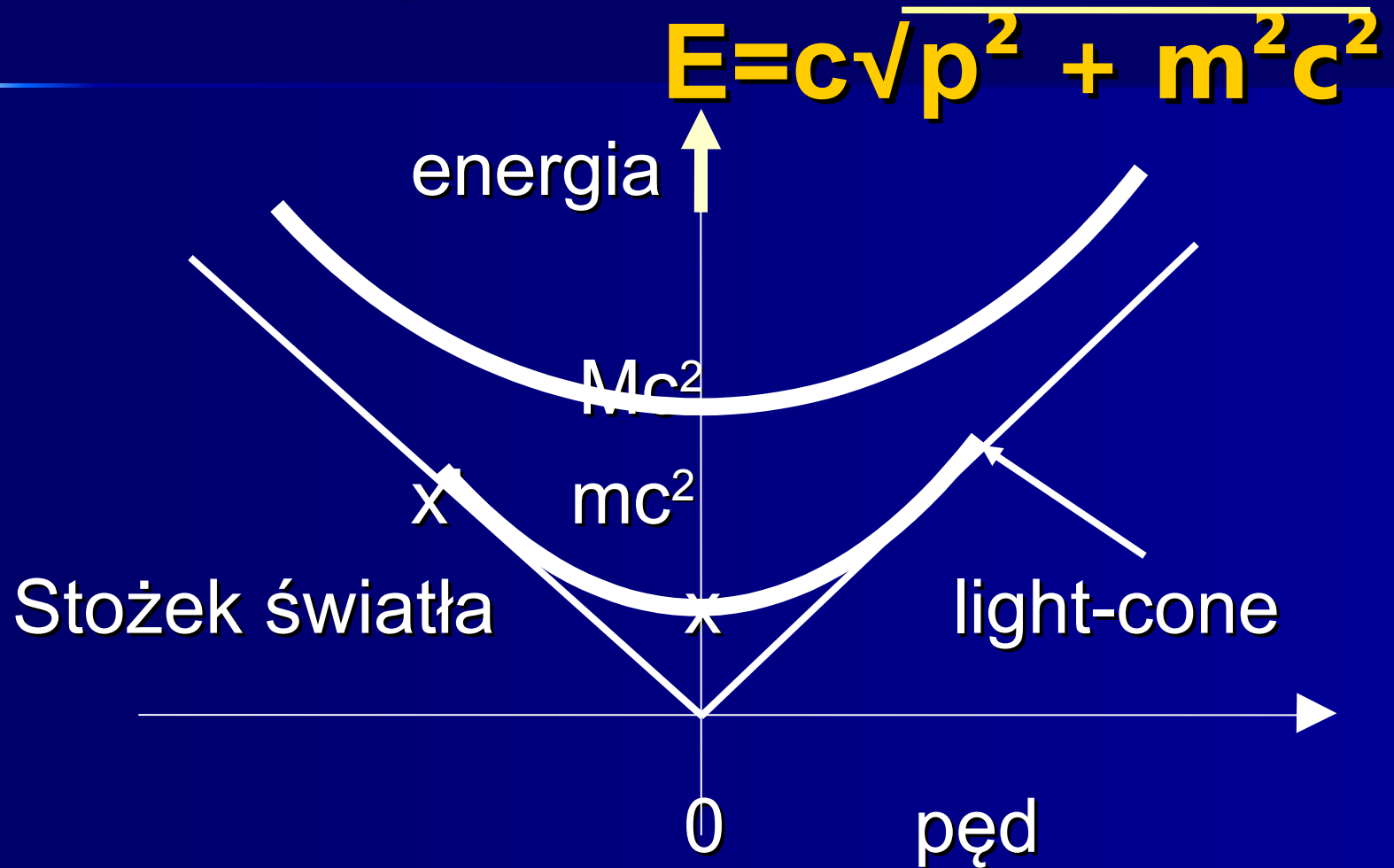
- Obroty i zmiana układu (stała prędkość) →
niezmienność Lorentza
Niezmienność Lorentza plus niezmienność
wzg przesunięcie w czasie i przestrzeni →
niezmienność Poincare

NIE WSZYSTKO JEST WZGLĘDNE!!

- Jeśli proces fizyczny jest zabroniony to jest zabroniony w każdym układzie, np rozpad
- Do opisu nieraz wygodny pewien układ.

Energia i pęd dla cząstki swobodnej

$$E = c \sqrt{p^2 + m^2 c^2}$$



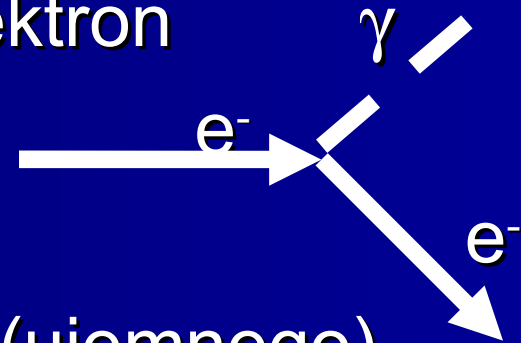
Zmiana układu odniesienia: $x \rightarrow x'$ (powłoka masy)

Teoria cząstek elementarnych

- 1948 – nowa faza mechaniki kwantowej
precyzyjne pomiary wymagały precyzyjnych obliczeń
→ **metoda Feynmana**
- Diagramy Feynmana i reguły Feynmana
dziś uniwersalne narzędzie fizyki cząstek
wpierw zastosowane w kwantowej elektrodynamice
(QED – Quantum Electrodynamics)
- QED – oddz. elektronów z fotonami; trudności
(nieskończoności w poprawkach kwantowych)
ale istnieje sposób obejścia → **procedura renormalizacji**
- Oddziaływania słabe $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$ – TRUDNOŚCI a
renormalizacja bezradna. Propozycja – nowe
oddziaływanie, nowe cząstki → teoria oddz. słabych
z bozonami W/Z i cząstką Higgsa renormalizowalna!
- Nagroda Nobla: Glashow, Salam, Weinberg 1979 (W/Z)
t'Hooft, Veltman 1999 (renormalizowalność)

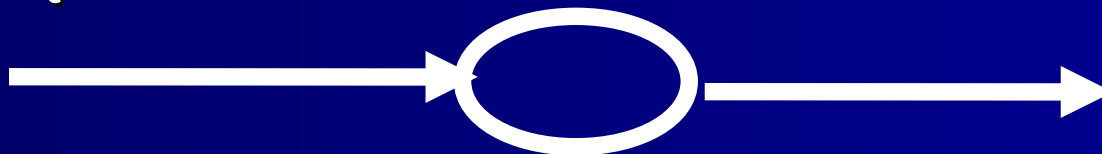
Diagramy Feynmana

- Diagramy – cząstki reprezentujemy przez linie a akt oddziaływania przez punkt przecięcia (wierzchołek)
- Np. emisja fotonu przez elektron



strzałki – przepływ ład. el. (ujemnego)

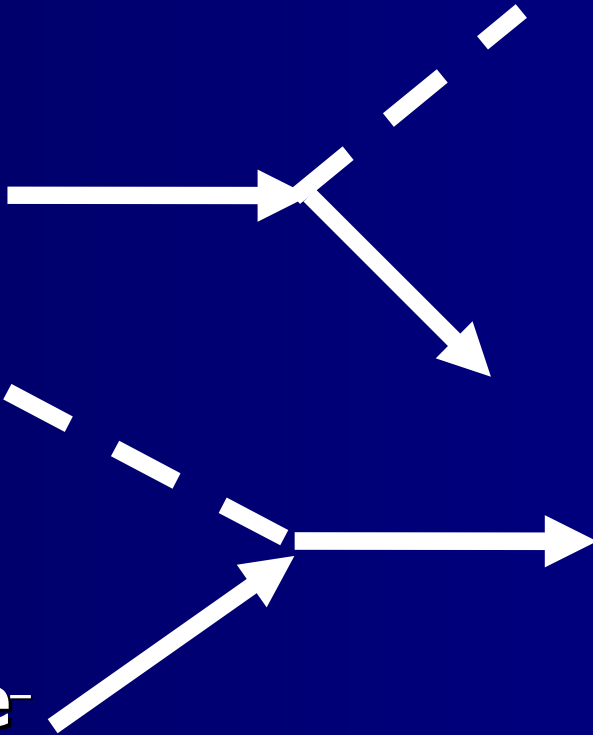
- Pętle



Procesy skrzyżowane: $ee\gamma$

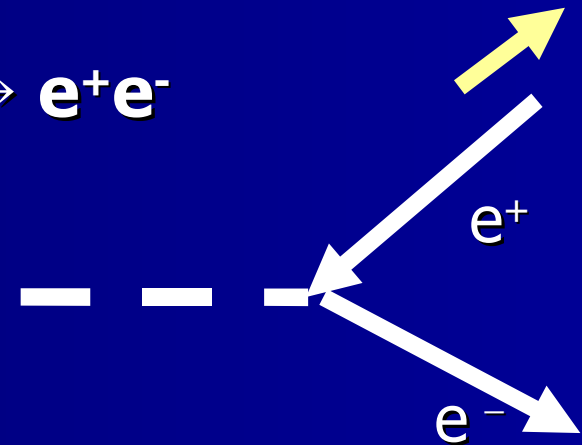
Czas $t \rightarrow$

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



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

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



Pęd e^+

strzałka do tyłu –
ładunek dodatni

Zasada zachowania energii i pędu

- Dla swobodnego elektronu proces $e \rightarrow e \gamma$ nie może być zrealizowany. Dlaczego?

Spoczywający elektron ma najniższą możliwą energią, po emisji fotonu nie może mieć mniejszej – a jeśli w jednym układzie niemożliwe to w innym układzie też nie jest możliwe

Jest to możliwe dla elektronu w atomie -elektron przechodzi do niższego stanu. W materii emisja fotonów $\rightarrow$ promieniowanie hamowania (bremsstrahlung)

- Dla swobodnego fotonu rozpad na e^+e^- też nie jest możliwy, bo obserwator lecący w kierunku fotonu widzi foton o niższym pędzie (energii).
Ale w pobliżu jądra – może

Linie wewnętrzne w diagramach

- Mechanika kwantowa pozwala na istnienie cząstek z niedostępnymi (tzn niezgodnymi z zasadą zachowania) energiami ale przez krótki czas (zasada Heinsenberga $\Delta E \sim 1/\Delta t$ ($c=1$))
Np. elektrony mogą mieć zerowa a nawet ujemną energię, lub b. dużą energię. Procesy kreacji i anihilacji par możliwe



- Cząstki wirtualne - cząstki dla których $E^2 \neq p^2 + m^2$ (cząstki „poza powłoką masy”) istnieją krótko i nie są obserwowane bezpośrednio

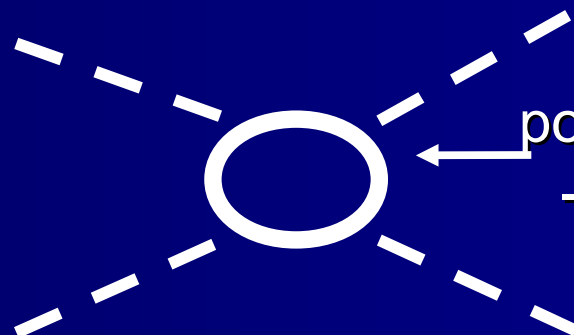
Diagramy Feynmana cd

Typowe zderzenie: $a+b \rightarrow c+d$



- Dzięki cząstkom wirtualnym
 - uwzględniamy interferencję
 - możliwe jest rozpraszanie światła na świetle

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$



pośredniczą cząstki naładowane
- fotony jako cząstki neutralne
nie oddziałują wprost ze sobą

Amplitudy i prawdopodobieństwa procesów

- Jeżeli znamy własności cząstek i sprzężeń → obliczenia prawdopodobieństwa procesów
- Cząstki początkowe wytwarzamy lub przygotowujemy
ale końcowe możemy tylko obserwować
- Interferencja: z określonego stanu początkowego do określonego stanu końcowego na wiele sposobów (*kanały procesu*) -wiele diagramów należy uwzględnić
(→ **suma amplitud nie prawdopodobieństw**)
- Pytanie: który konkretnie proces się zdarzył – to jak pytanie którą szczeliną przeszedł foton ...

Nieskończoności

- Opis procesu - uwzględniamy wszystkie możliwe diagramy (procesy) pozwalające na przejście od stanu początkowego do stanu końcowego.
- Procesy z cząstkami wirtualnymi (o różnych energiach) ale w niektórych z nich cząstki te mogą mieć dowolnie wielkie energie.
Pytanie: czy te wkłady są tłumione?
- Nieraz nie są tłumione → nieskończone prawdopodobieństwo procesu

Tłumienie wkładu od pętli

- Tłumienie większe dla cząstek bardziej wirtualnych
- Tłumienie zależy od typu cząstki, szczególnie ważne jest jaki jest spin cząstki
(Zachowanie całkowitego momentu pędu: jeżeli w stanie początkowym cząstka ze spinem to w stanie końcowym wystąpi cząstka ze spinem albo cząstki bezspinowe ale ze wzajemnym momentem pędu)
- Im spin większy tym mniejsze tłumienie dla dużych wirtualności → problemy z cząstkami ze spinem 1
- Tłumienie zależy też od typu sprzężenia

Nieskończoności i renormalizacja

- Problem z fotonem? – wkłady od różnych diagramów kasują się, co wykazali 1948 Feynman, Tomonaga, Schwinger (Nobel 1964) – procedura renormalizacji
- QED prowadzi do skończonych przewidywań. Bardzo precyzyjnych przewidywań – np. dla anomального momentu mionu
- Dla oddziaływań słabych w bozonami W i Z (też spin 1) – problem większy, ale nowe oddziaływanie i nowe diagramy mogą tu pomóc

Rachunek zaburzeń

- Musimy sumować wkłady, w tym z większą liczbą wierzchołków
- Ale to jest nieskończony szereg...
- W wielu wypadkach nie musimy sumować do końca – np. w QED sprzężenie proporcjonalne do ładunku elektrycznego – to jest małe sprzężenie

$$e_2 \rightarrow \alpha = e_2 / (4 \pi) \sim 1/137$$

czyli kolejny człon w szeregu $\sim 1\%$

- Rachunek zaburzeń (r.perturbacyjny) - precyzja

Standard Model contributions

QED

$11\,658\,470.57(.29) \times 10^{-10}$

Had

$692.4(6.2) \times 10^{-10}$ $-10.1(.6) \times 10^{-10}$ $12(4.0) \times 10^{-10}$

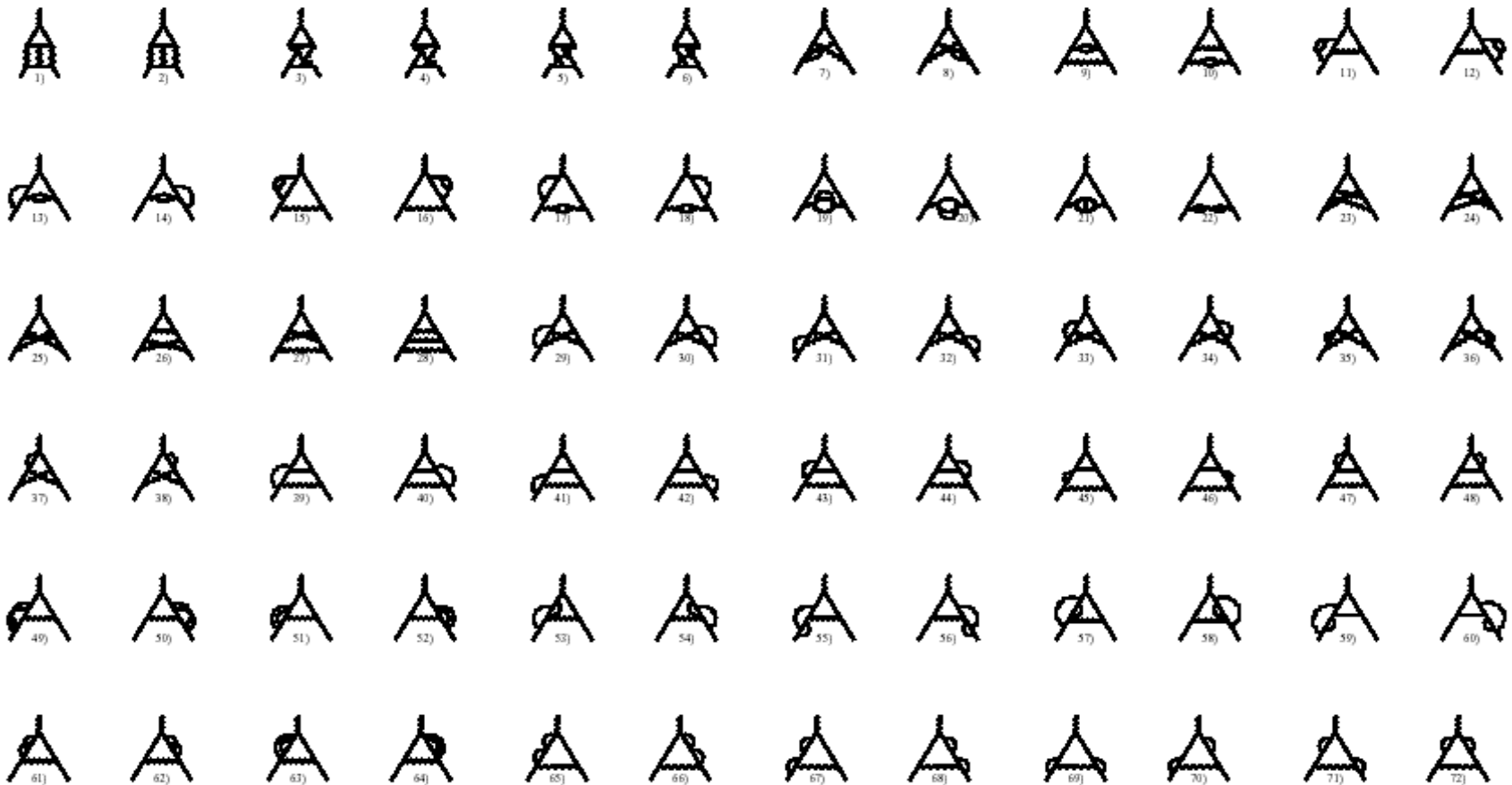
Weak

$+38.9$ -19.4 < 0.1

1st + 2nd Order Weak = $15.1(.4) \times 10^{-10}$

e vs. μ : relative contribution of heavier things $\left(\frac{m_\mu}{m_e}\right)^2 \simeq 40,000$

3rd order QED contributions



QED Contribution a_μ^{QED}

$$\begin{aligned}
 a_\mu^{\text{QED}} \cdot 10^{10} = \Sigma C_i \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^i = & \quad 11614097.3 \text{ (1-loop)} \\
 & + \quad 41321.8 \text{ (2-loop)} \\
 & + \quad 3014.2 \text{ (3-loop)} \\
 & + \quad 38.1 \text{ (4-loop)} \\
 & + \quad 0.4 \text{ (5-loop)}
 \end{aligned}$$

Terms up to α^3 are known analytically, a recent more accurate numerical calculation of the α^4 terms and the leading $\log \alpha^5$ terms gave
(T. Kinoshita and M. Nio, 2005; A.L. Kataev, 2006):

$$a_\mu^{\text{QED}} = (116584719.4 \pm 1.4) \cdot 10^{-11}.$$

From the latest value of a_e (G. Gabrielse et al., 2006; M. Passera, 2006):

$$\alpha^{-1} = 137.035999710(96), \quad a_\mu^{\text{QED}} = (116584718.09 \pm 0.14 \pm 0.08) \cdot 10^{-11}.$$

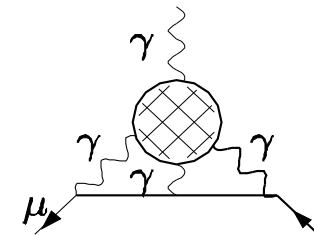
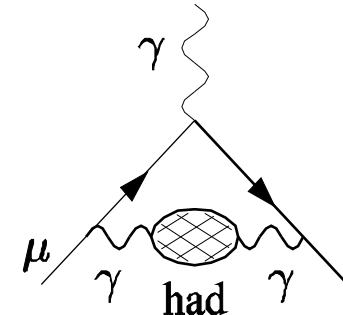
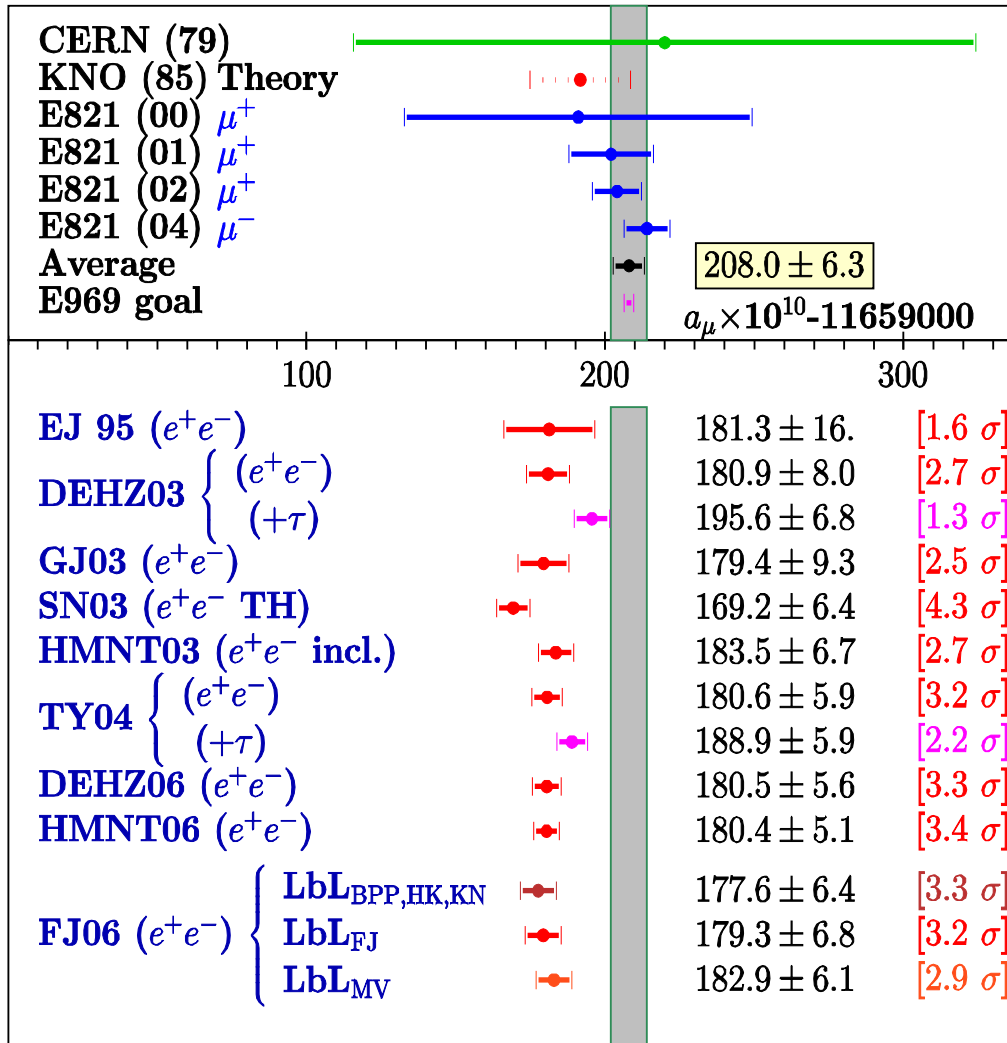
The errors are due to: a/ $\mathcal{O}(\alpha^5)$, b/ α

g-2 for muon (Jegerlehner'07)

New Physics?

$$\delta a_\mu = (287 \pm 91) 10^{-11}$$

3.2 σ



Idea renormalizacja

- Możliwa niezbieżność szeregu sumującego: różne wkłady i energie/pędy cząstek wirtualnych
- Idea renormalizacji: 1948 Kramers dla QED – nieskończoności występują tylko w kilku określonych wyrażeniach
- Nieskończoności nie ma w anomalnym momencie magnetycznym mionu ani elektronu bo jeśli występują to takie same w obliczeniach ładunku elektrycznego oraz momentu magnetycznego. Możemy wyrazić jedno przez drugie a dla ładunku el. przyjąć wartość doświadczalną – czyli to jest **trik**

Trik bardzo skuteczny

nazwa uczona: renormalizacja

- Jeżeli nieskończoności tylko w wolnych parametrach teorii (każda teoria ma takie parametry, np G_N - stała grawitacyjna)
- Ładunek el. jest wolnym (wyjściowym) parametrem QED – „input” teorii, masa elektronu m_e – też.
- Skoro teoria nie przewiduje tych parametrów – to możemy w nich ukryć nieskończoności

Renormalizacja działa dobrze

- Ale świadczy o niedoskonałości teorii

- Dobrze, że można kłopotliwe człony wyizolować

- Problemy teorii typu QED:

 - teoria jedynie perturbacyjna

 - występują nieskończoności

ale można je izolować

ALE w bardzo dobrej zgodności z danymi

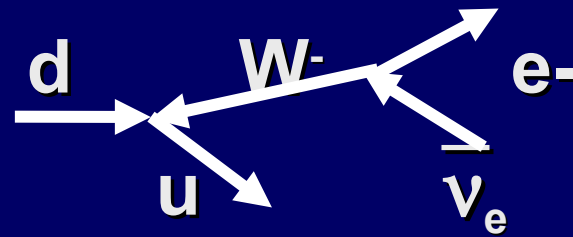
Nierenormalizowalność

- Są teorie z nieskończonościami zawartymi nie tylko w wolnych parametrach
- Długo sądzono, że tak jest np. dla teorii z cząstkami o spinie 1 ale innymi niż foton
- Dziś wiemy, że można mieć renormalizowalne teorie z cząstkami o spinie 1 – o ile są to teorie z cechowaniem (**gauge theories**), dokładnie
→ **teorie Yanga-Millsa**
- Grawitacja inna – to teoria z cechowaniem, ale nierenormalizowalna

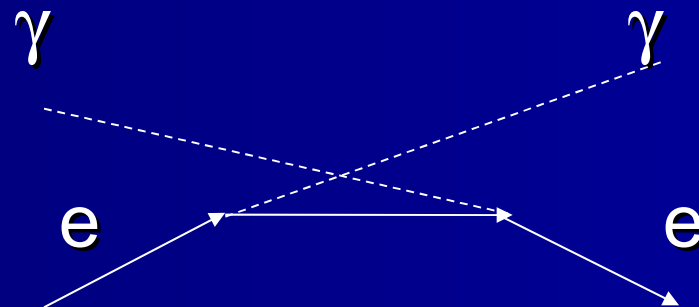
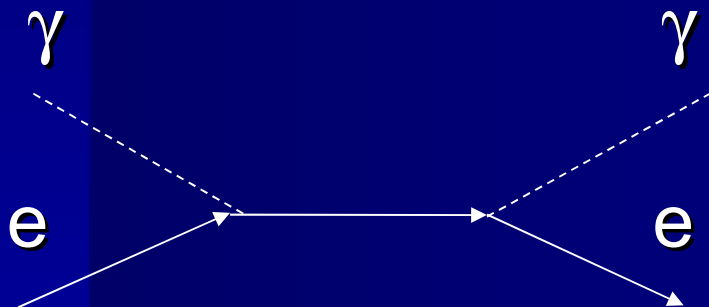
Oddziaływania słabe

- Nie prowadzą do sił działających na dużych odległościach
- Odkrycie, Becquerel 1896
radioaktywność β
- Na poziomie fundamentalnym w rozpadzie β
 $d \rightarrow u W^-$ podstawowy wierzchołek – stała sprzężenia g („ładunek słaby”) $\alpha_w = g^2/4\pi = 1/32$
większa niż α_{em} , (ale oddziaływanie słabsze niż e-m bo masa W/Z duża)
- Strzałki na liniach zgodnie z pędem dla cząstek,
a dla antycząstek strzałka przeciwna do pędu;
 W^- - antycząstka do W^+

Rozpad $d \rightarrow u e \bar{\nu}_e$



- W jest bardzo masywne (80.4 GeV)
więc w tym rozpadzie W jest bardzo wirtualne,
daleko poza powłoką masy
- Rozpad $d (W^-)$ i rozpad $\bar{d} (W^+)$;
 W ma spin 1 i mamy kłopoty z renormalizowalnością
- Aby dokładnie przedyskutować ten problem
najpierw przeanalizujemy rozpraszanie Comptona
(dwa diagramy) $\gamma e \rightarrow \gamma e$



Zachowanie teorii dla dużych energii

- Żle jeśli prawdopodobieństwo procesów rośnie z energią, gdyż może przekroczyć 1
- Rozpraszanie Comptona – każdy diagram daje wkład rosnący z energią ale suma diagramów – OK (kasowanie)
- Kasowanie wynika ze struktury teorii (symetria cechowania)

Obliczenia prawdopodobieństw-reguły Feynmana

Reguły gry (reguły Feynmana)

- Wchodzący lub wychodzący foton
(cząstka wektorowa o **spinie 1** – czynnik E
($E = \text{energia}$)
Foton wirtualny – czynnik 1
- Wchodząca lub wychodząca cząstka o **spinie $\frac{1}{2}$** -
czynnik $\sqrt{E}$, wirtualna cząstka o spinie $\frac{1}{2}$ - czynnik $1/E$
- Wchodząca lub wychodząca cząstka o **spinie 0** -
czynnik 1, wirtualna cząstka o spinie 0 - czynnik $1/E^2$
- Ale są jeszcze **dodatkowe czynniki** wynikające ze
sprzężeń, np wirtualny W sprzęgający się do dwóch
rzeczywistych (na powłoce masy) cząstek z obu
końców – czynnik $1/E^2$

Gramy: proces Comptona

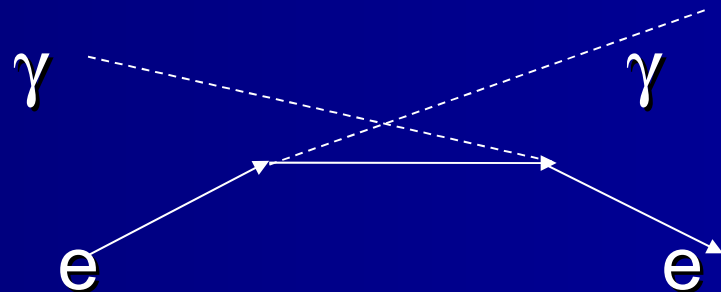
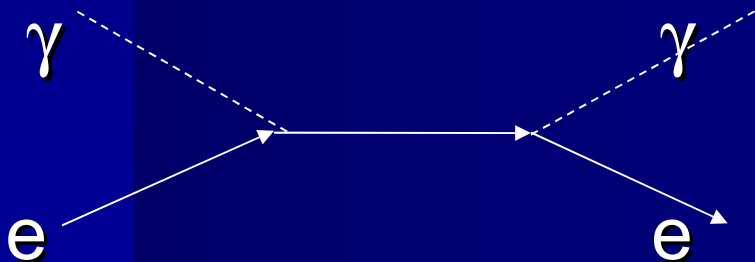
Dla tego procesu amplituda rośnie z energią jak

$$E^2 (\sqrt{E})^2 1/E = E^2$$

(zaś prawdopodobieństwo E^4)

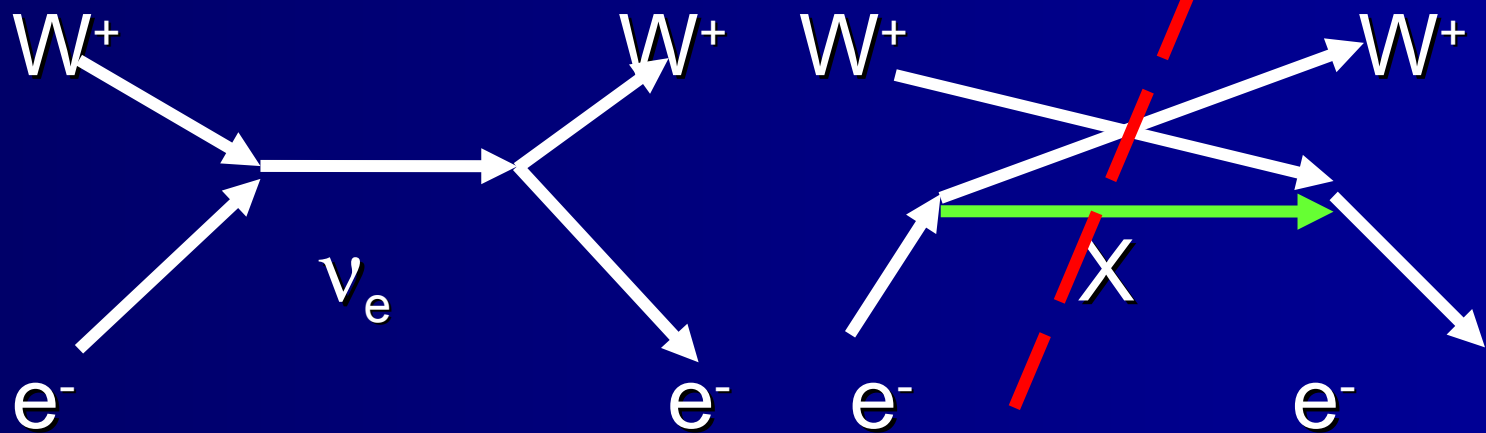
Złe zachowanie każdego z diagramów,
ale w sumie (dodajemy amplitudy!)
kasuje się te wkłady i uzyskany wynik jest
niezależny od energii

$$\gamma e \rightarrow \gamma e$$



Rozpraszanie W

- Zastępując γ przez W



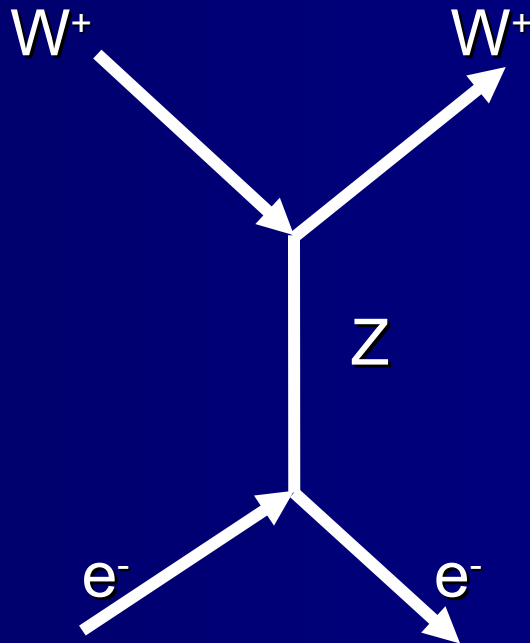
Zachowanie ładunku: X^{--} podwójnie naładowana cząstka –

ale taka cząstka nie istnieje!

Zachowanie złe (amplituda): $E^2 (\sqrt{E})^2 1/E = E^2$

Neutralny bozon Z konieczny!

- Diagram z bozonem Z



Zachowanie E^2 ($\sqrt{E}$)² (**wierzchołek $WWZ \sim E$**)/ $E^2 = E^2$, i
dobry znak sprzężenia WWZ – kasowanie jak dla
procesu Comptona !

Cena: nowa cząstka bozon Z z określonym oddziaływaniem

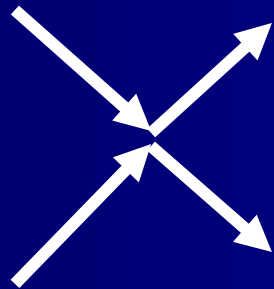
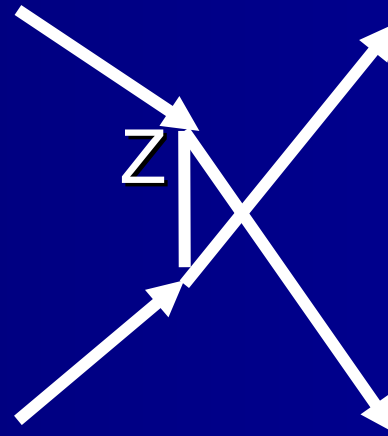
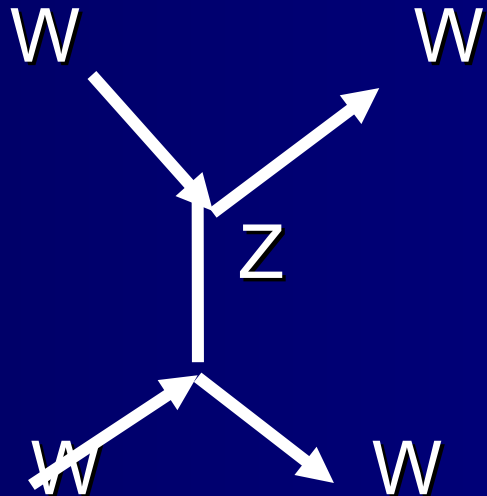
Znaleziono ją – to bozon Z !

→ sukces teorii

Rozpraszanie bozonów W na sobie

$\sim E^4$ (bo $E^4 E^2/E^2$) - coraz gorzej...

- Procesy z samymi bozonami W



Nowy typ procesu!

kasowanie członu E^4

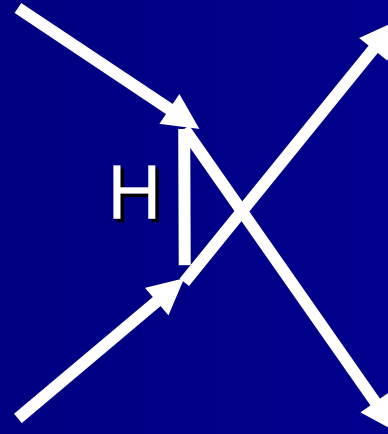
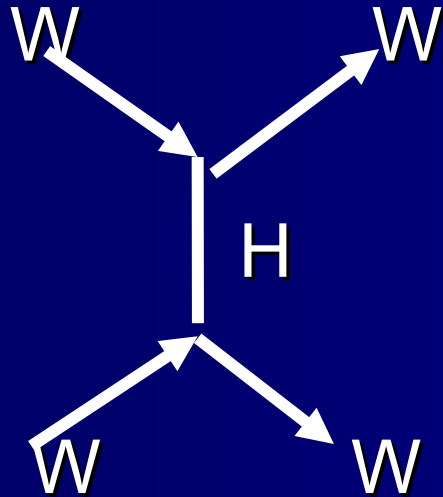
ale nie E^2

Człon E^2 to w istocie to $E^2 M^2$ - uwaga cząstka Higgsa!

- Z analizy wymiarowej wynika, że w amplitudzie pozostają człony typu $E^2 M^2$
(M- masa bozonów W lub Z)
- Musimy coś jeszcze dodać tak aby te człony usunąć – cząstka o spinie 0 sprzęgająca się do W i Z, odpowiednio (bozon H)

Rozpraszanie bozonów W na sobie

- wkład od H



Sprzężenia proporcjonalne do mas cząstek
do których H się sprzęga $\rightarrow$

dobrze zachowanie dla procesu $WW \rightarrow WW$

Koniec?

- Konieczność istnienia cząstki H - sprzęga się do każdej cząstki masywnej
- Nie znaleziona dotychczas
- Oczekujemy: masa ok. 100 GeV
- Teoria oddziaływań EW –renormalizowalna, tylko H potrzeba i zamykamy teorię (Model Standardowy)

Generacja masy?

- Ponieważ H sprzęga się do masy zakłada się powszechnie, że cząstka Higgsa jest również związana z generacją mas cząstek

Spontaniczne łamanie symetrii → przewidywania dotyczące cząstki H identyczne jak z analizy prawdopodobieństw dla rozpraszania $WW \rightarrow WW$

- Masy- więc oczekiwany związek z grawitacją (i strukturą Wszechświata)

Parametr ρ

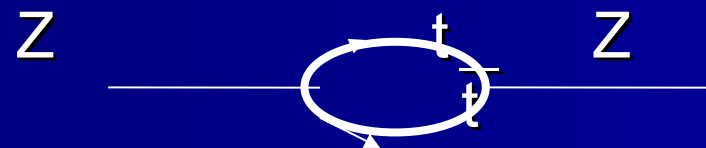
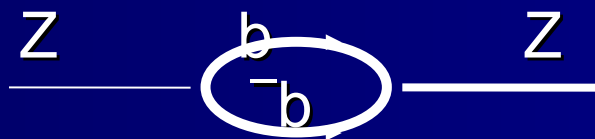
- Inne procesy rozpraszania typu WZ, ZZ
 - wszystkie problemy „rozwiązuje” tylko jedna cząstka H o ile określony związek mas W i Z
$$\rho = M_W^2 / (M_Z^2 \cos^2 \theta_W) = 1$$
- Poprawki kwantowe (wyższe rzędy szeregu) modyfikują ten związek nieco
- Kwark t daje poprawkę rosnącą z m_t^2
 - to pozwoliło wyznaczyć masę zanim odkryto kwark t (1995)

Nobel 1999 (Veltman, t'Hooft)

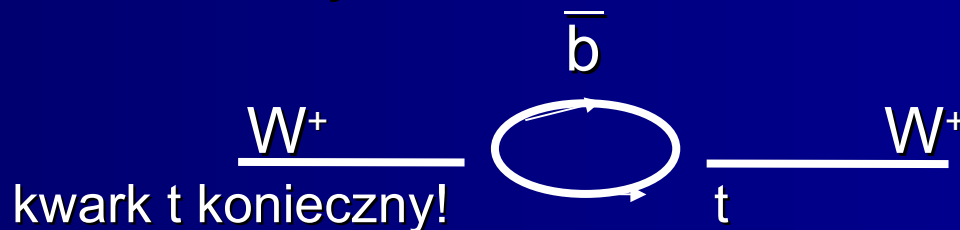
- Struktura poprawek zgodna z symetrią cechowania

Poszukiwanie cząstki Higgsa

- Jedna czy więcej?
- Mierząc ρ – jedna cząstka H wystarczy
- Poprawki do masy Z (energia własna Z) – wkłady osobliwe ale się kasują

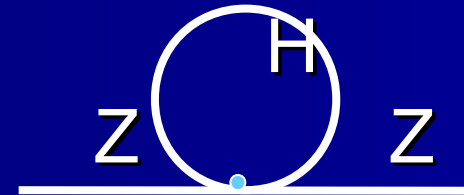
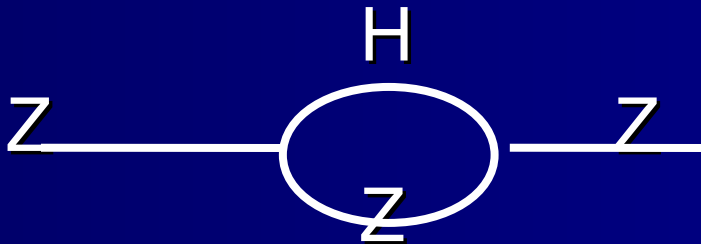


- Poprawki do masy W



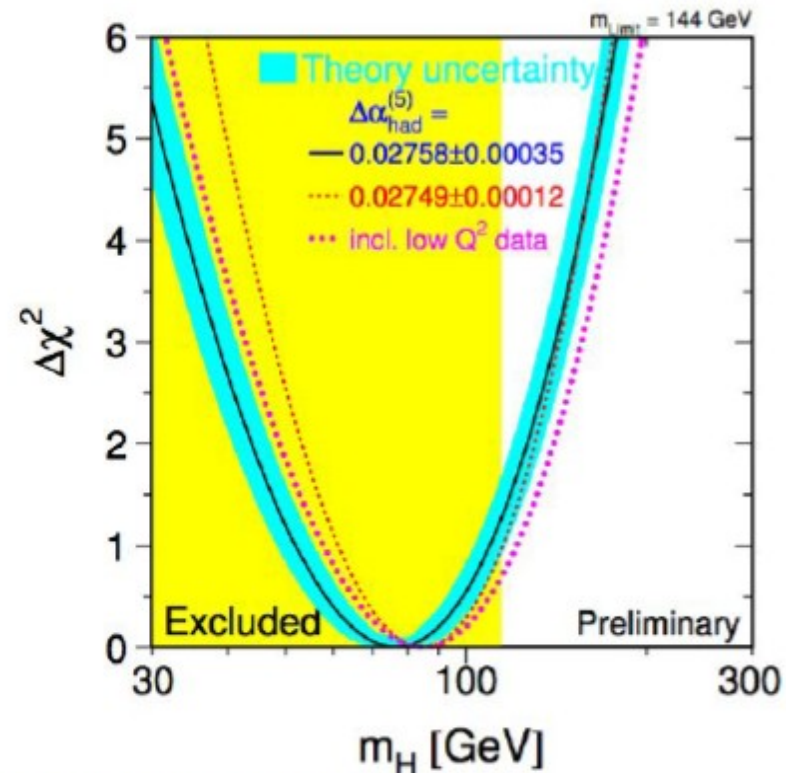
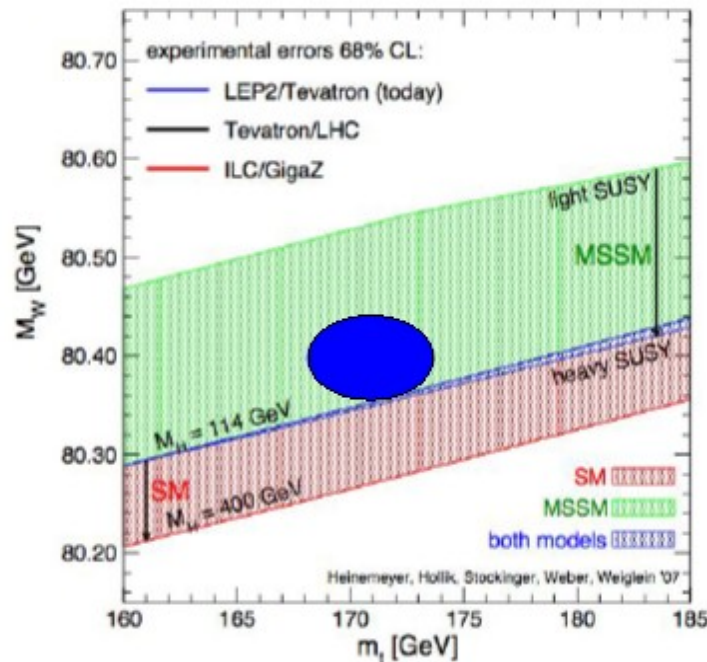
Poprawki do mas W/Z od H

- Pętle z H

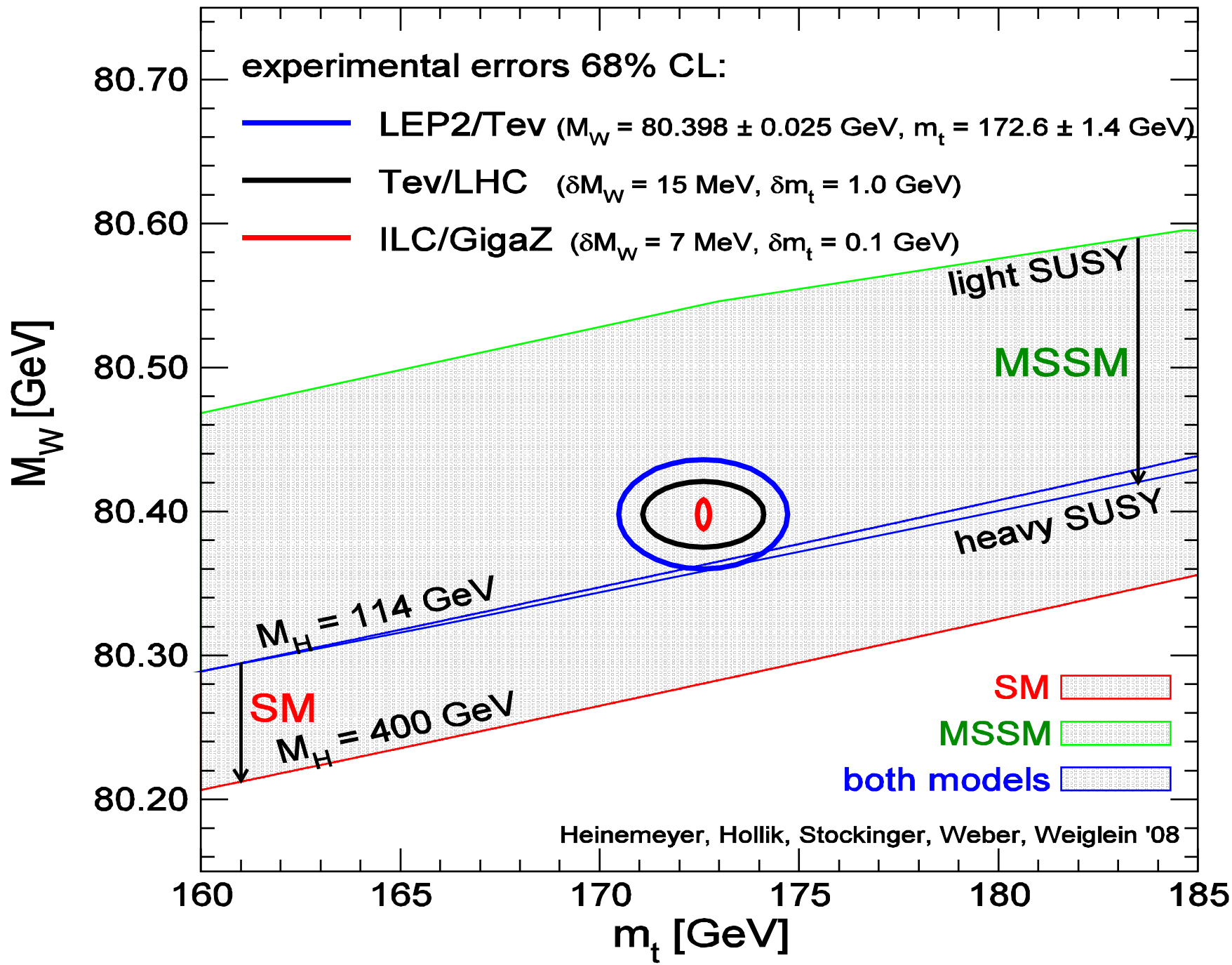


- Zmieniają stosunek mas W i Z ale znacznie mniej niż b i t
- Ale te wkłady od H powodują że przewidywania dla mas t niepewne 5%
Po odkryciu kwarku t → oszacowania na masę H około 100 GeV

M_W , m_{top} and m_{Higgs}



- Indirectly: $m_H < 144$ GeV@95%CL
- Directly (LEP): $m_H > 114$ GeV@95%CL
 - Standard Model excluded at 68% CL



Samo-oddziaływanie cząstek H

- Dwie cząstki H przyciągają się- mogą powstać stany związane, a pewna część energii ujemna (en. wiązania)
- Stan związany wielu (nieskończenie wielu) cząstek H i całkowita energia ujemna takiego stanu. Jest on rozciągły przestrzennie..
- Takie obiekty mogły powstać na początku Wszechświata, i oddziaływanie grawitacyjne
- Wszechświat wielkości piłki futbolowej - zakrzywienie Wszechświata
- Teorie, że Wszechświat był początkowo zakrzywiony w przeciwny sposób i po wystąpieniu stanów H zniesienie krzywizny → dziś Wszechświat płaski

Więcej na następnych wykładach

The theory ends here -

Veltman

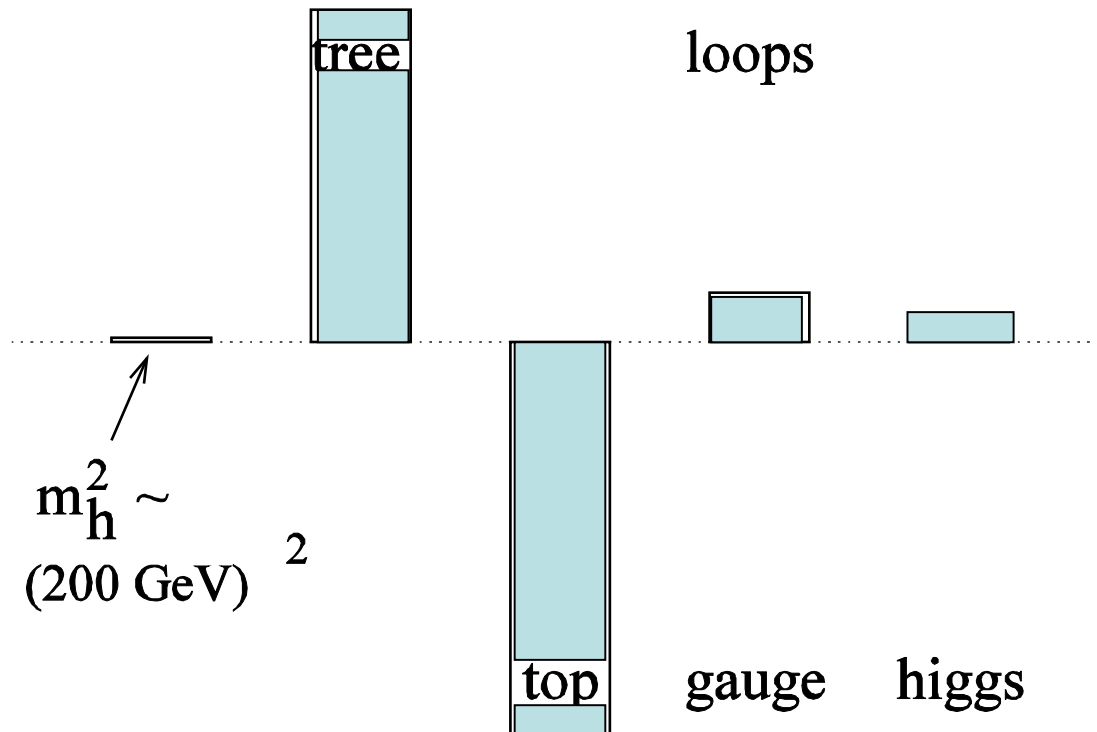
- Samo-oddziaływanie H proporcjonalne do masy H
- Dla dużych mas (>500 GeV) załamuje się rachunek zaburzeń
- *The theory ends here. We need help. Experiments must clear up this mess.*
→ LHC pp,
ILC e^+e^- (PLC $\gamma\gamma$, $e\gamma$)

Problemy Modelu Standardowego

- Wiele parametrow (np.masy)
- Dlaczego trzy rodziny?
- Niezerowa masa neutrin
- Problem hierarchii- poprawki kwantowe
$$M_H \ll M_{\text{Planck}} \text{ (} 10^{19} \text{ GeV)}$$
- Grawitacja?
- Opisuje 4 % wszechświata – brak kandydatów na ciemną materię

Odstępstwa od Modelu? No, i gdzie jest Higgs?

Fine tuning



Poza Modelem Standardowym

- 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

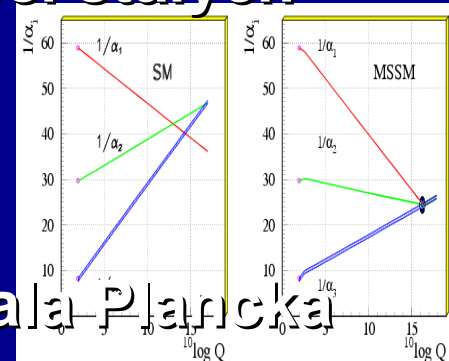
- Wielka Unifikacja (Grand Unified Theory - GUT)
 $\rightarrow$ łączenie oddziaływań EW i silnych. Symetria cechowania GUT widoczna przy energiach powyżej 10^{16} GeV. Zbliżanie się wartości stałych sprzężenia

- Największa skala energii w fizyce ?

W grawitacji – naturalną skalą jest skala Plancka
 masa Plancka $M = (\sim c / G_N) = 1.2 \cdot 10^{19}$ GeV

G_N – stała

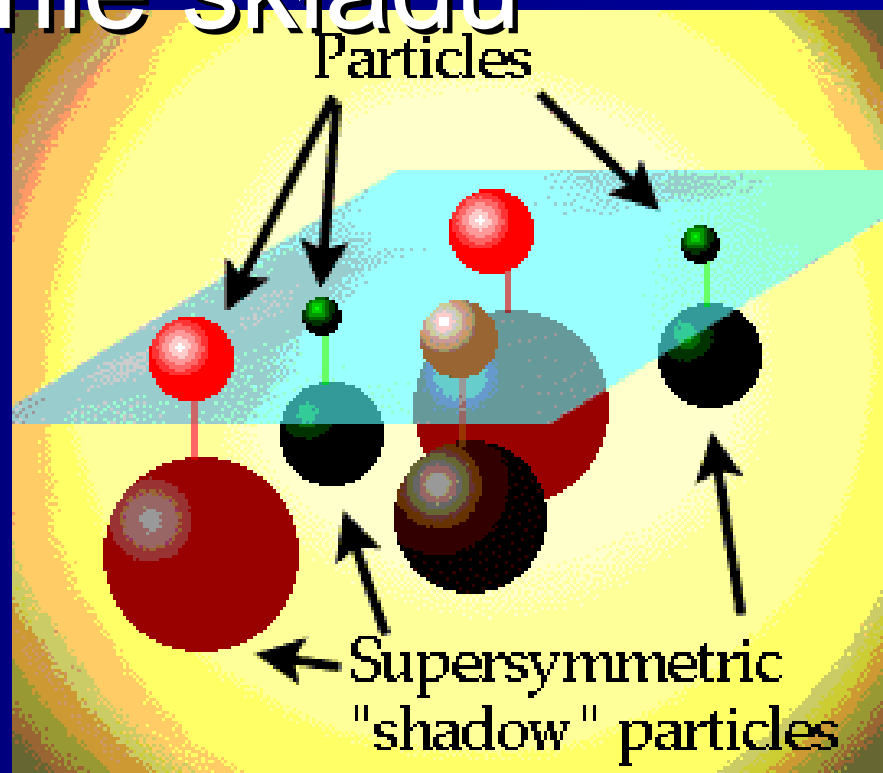
Newtona, długość Plancka $1.6 \cdot 10^{-35}$ m



SUPERSYMETRIA

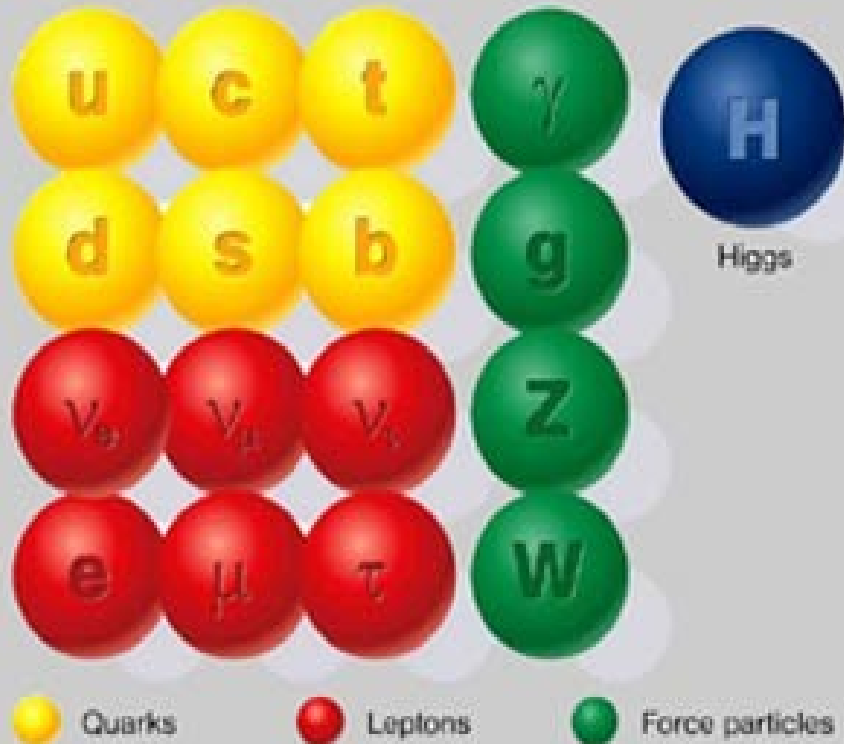
- Symetria fermion – bozon
czyli podwojenie składu
cząstek

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

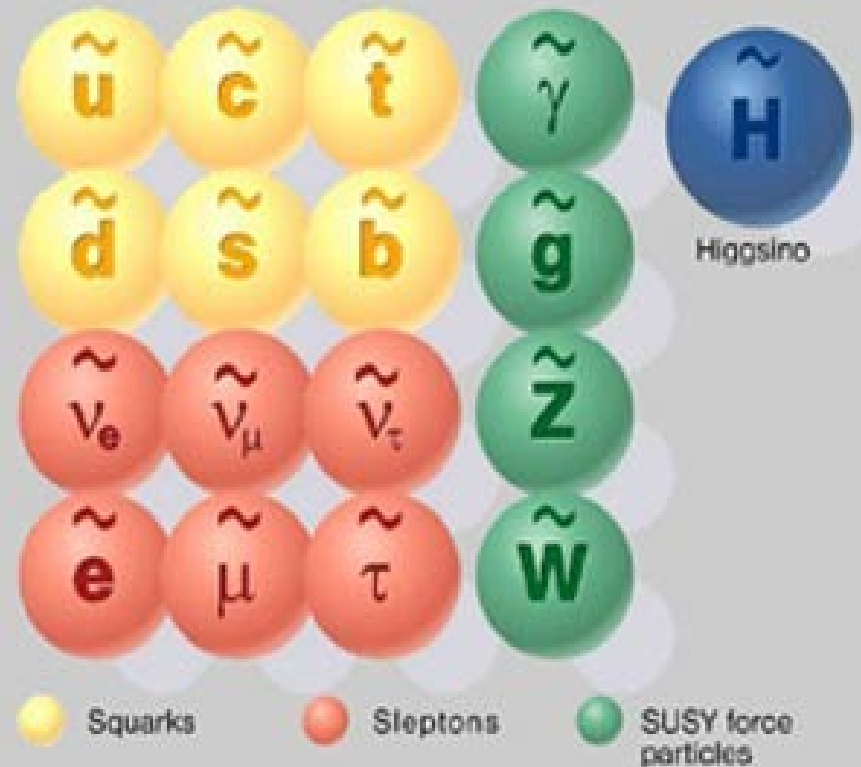


Słodcy partnerzy

Standard particles



SUSY particles

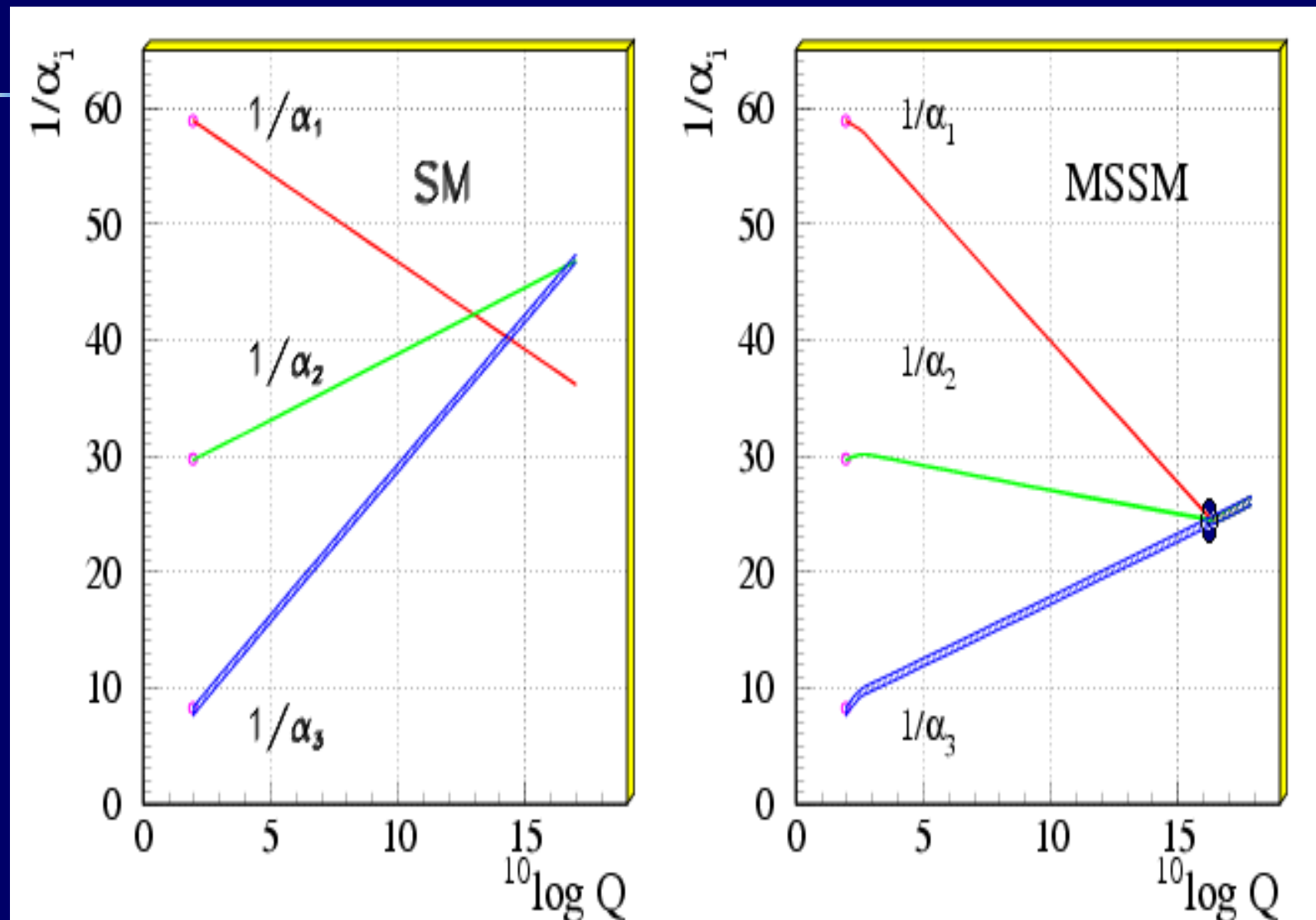


Masy ~ 1 TeV

Supersymetria jest super

- Problem hierarchii usunięty – kasowanie się wkładów od fermionów i bozonów
- Unifikacja oddziaływań: lepsze „zbieganie” stałych sprzężenia
- Nowa liczba kwantowa R , więc najlżejsza cząstka SUSY jest trwała → kandydat/ka na ciemną materię

Unifikacja sił



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 (zespolonych) → aby nadać masy. Przewidywane cząstki fizyczne: 5 cząstek Higgsa h, H, A i $H^\pm$ (spin 0) (h jak w SM)

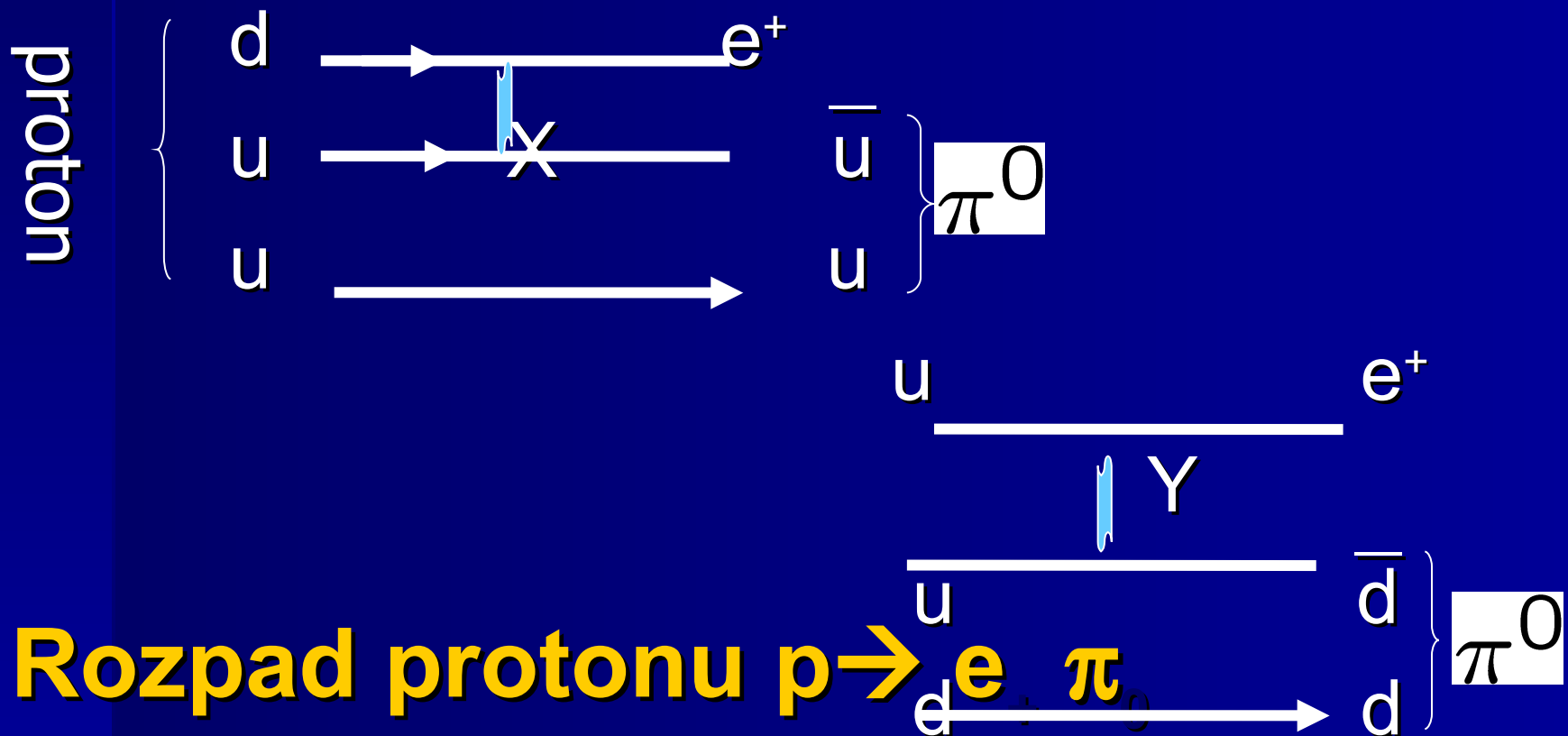
higgsina o spinie $\frac{1}{2}$

- Gejdżina mieszaja się z higgsinami
→ 4 fizyczne cząstki neutralina i 4 czardżina

Teoria Wielkiej Unifikacji: SU(5)

- Symetria cechowania SU(5) (zawiera SU(2)xU(1)xSU(3) jako podgrupę)
zapropozowano w 1974
- 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, $W^\pm, Z = 24$ bozony cechowania
- 3 generacje fermionów (15 stanów) np.
 $u_c, u_z, u_n, d_c, d_z, d_n, e^-, \nu_e$ w różnych stanach spinowych;
również leptokwarki występują X, Y
- Zalety: skwantowanie ładunku el.; ład. el. $e = -$ ład. el. p
- Wada: proton się rozpada w wyniku wymiany
bozonów X i Y za szybko: czas życia 10^{30-31} lat

■ Przykłady procesów z wymianą X i Y



KALUZA-KLEIN THEORY

D.Gross



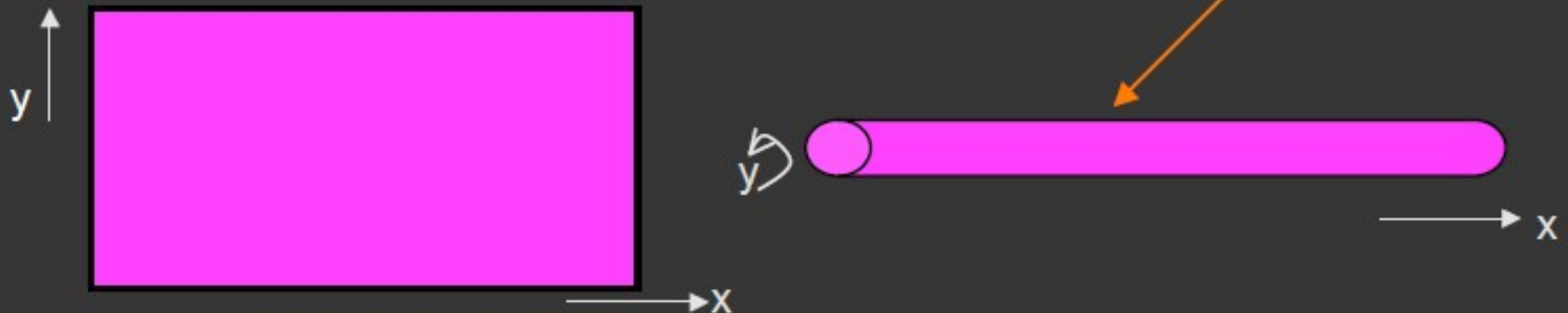
(1919-21) If space-time is dynamical there might exist new, curled up, spatial dimensions.

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

- Teoria Wszystkiego (Theory of Everything)
połączenie wszystkich oddziaływań wraz z grawitacją.
W kwantowej grawitacji – oddziaływania punktowe --> osobliwości
- Zastępujemy cząstki punktowe – strunami o skończonej długości
- W grawitacji – skala Plancka
 $l_P = 1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$, $M_P = 1.2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$
- Cząstki – zamknięte pętle i różne wzbudzenia strun → różne cząstki fundamentalne.
- Teoria renormalizowalna w przestrzeni o wymiarach 10 lub więcej, początkowo teoria dla oddz. silnych ale tu grawiton (bezmasowa cząstka o spinie 2) się pojawia w wersji supersymetrycznej
- Parametr opisujący struny α' -..Brak 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)

Czekając na LHC (ILC..)

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.