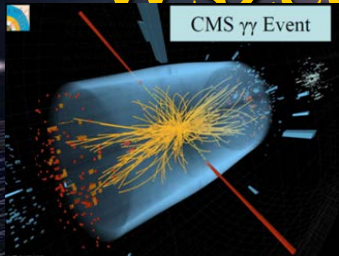


# Wszechświat cząstek elementarnych



## WYKŁAD 10 24.IV.2013

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

Teoria cząstek elementarnych- opis zdarzeń  
Rachunek zaburzeń i nieskończoności  
Renormalizacja  
Prawdopodobieństwo procesów  
dla dużych energii  
i „konieczność” istnienia cząstki Higgsa

# Teoria cząstek elementarnych – opis zdarzeń

- Efekty relatywistyczne i kwantowe, takie jak procesy powstawania i znikania cząstek, oraz ich mieszania i rozpady → opis w ramach **Kwantowej Teorii Pola**

(Quantum Field Theory QFT)

- Technika obliczeniowa QFT
  - rachunek zaburzeń:
    - drzewa (tree) i pętle (poprawki kwantowe, loops)
  - język obrazkowy (diagramy Feynmana 1948, dla QED)

# Teoria cząstek el. - trudności

- QED opisuje oddz. elektronów z fotonami;  
ALE trudności bo poprawki kwantowe **nieskończone**.  
Sposób obejścia → **procedura renormalizacji**  
idea renormalizacji Kramers 1938 r.
  - Oddziaływania słabe – jeszcze większe TRUDNOŚCI.  
Propozycja: **nowe oddziaływanie, nowe cząstki** →  
teoria oddz. elektroślabych z bozonami W/Z i cząstką  
Higgsa renormalizowalna (podlegająca procedurze  
renormalizacji)
- Nagrody Nobla: Glashow, Salam, Weinberg 1979 (W/Z)  
t'Hooft, Veltman 1999 (renomalizowalność)

# Efekty relatywistyczne

## (szczególna teoria względności)

- Najbardziej bezpośredni przejaw efektów relatywistycznych w fizyce cząstek elementarnych to czas życia cząstek → dłuższy dla poruszającej się cząstki (*dylatacja czasu*)  
Miony, które powstają w górnych warstwach atmosfery docierają na powierzchnię Ziemi tylko dzięki wydłużonemu czasowi życia (inaczej przebyłyby tylko ok. 660 m).

*Podobny efekt - skrócenie długości (Lorentza)*

- Szczególna teoria względności Einsteina opiera się o postulaty:
  - Niezmienniczość praw fizyki względem zmiany układu odniesienia (dla układów poruszających się ze stałą prędkością)
  - Stała prędkość światła  $c$  w układach odniesienia poruszających się ze stałą prędkością względem siebie (*bardzo nieintuicyjne*)

Transformacja Lorentza wiąże pomiary w różnych układach odniesienia, np.  $x'=f(v/c)[x+vt]$   $t'=f(v/c)[t+v/c^2x]$   $y'=y$ ,  $z'=z$   
Czas i położenie „mieszają” się....(czaso-przestrzeń)  
w granicy  $c \rightarrow$  nieskończoności:  $x'=x+vt$ ,  $t'=t$  (transformacja Galileusza)

# Niezmienniczość

Niezmienniczość praw względem „obrotów”  
w czaso-przestrzeni, w tym zmiany układu odniesienia  
(poruszających się ze stałymi prędkościami) →  
niezmienniczość Lorentza

(Niezmienniczość Lorentza plus niezmienniczość względem przesunięć w czasie  
i przestrzeni → niezmienniczość Poincare'go)

**NIE WSZYSTKO JEST WZGLĘDNE!!**

Jeśli proces fizyczny jest zabroniony w jakimś  
układzie odniesienia, to jest zabroniony w każdym  
układzie, np. rozpad cząstki

- Do opisu nieraz wygodny pewien konkretny układ...

# Możliwe procesy

- Dla wszystkich procesów rozpadów i rozpraszania cząstek spełniona jest zasada zachowania energii i pędu

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

Spoczywający elektron ma najniższą możliwą energię, po emisji fotonu nie może mieć mniejszej.

A jeśli w jednym układzie jest to niemożliwe, to w innym układzie też nie jest możliwe.

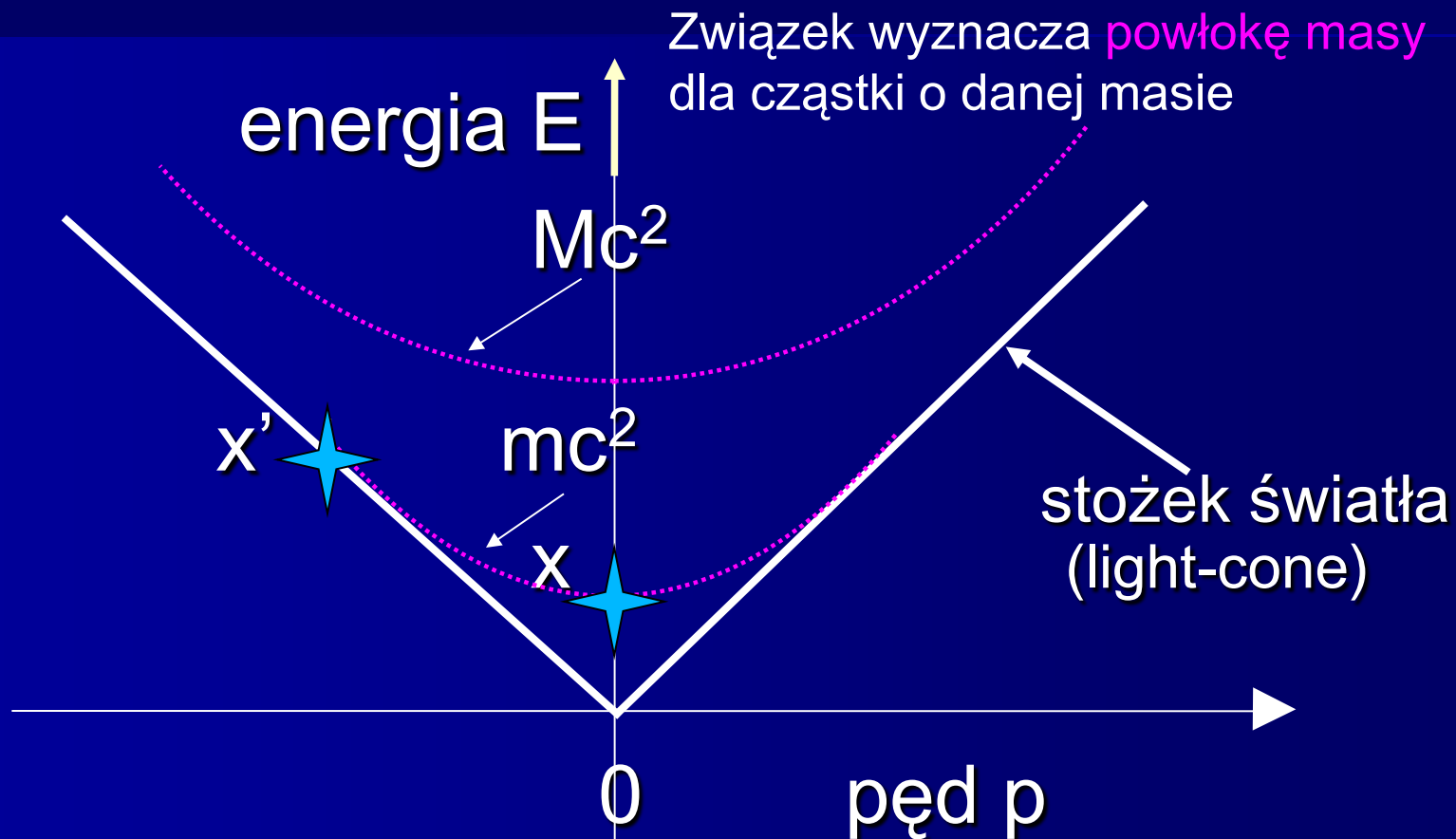
*Jest to możliwe dla elektronu w atomie, bo elektron przechodzi do niższego stanu. W materii emisja fotonów też jest możliwa → promieniowanie hamowania (bremsstrahlung)*

- Dla swobodnego fotonu rozpad  $\gamma \rightarrow e^+e^-$  też nie jest możliwy, bo obserwator lecący w kierunku fotonu widzi foton o niższym pędzie (czyli energii, bo tu  $E=pc$ ).

*Ale w pobliżu jądra – może*

# Energia i pęd dla cząstki swobodnej

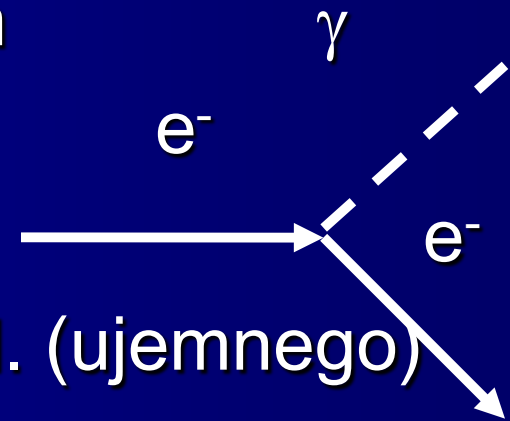
$$E = c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$$



zmiana układu odniesienia:  $x \rightarrow x'$   
(cząstka na **powłoce masy**)

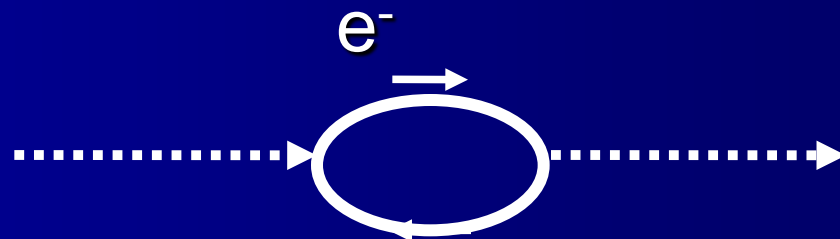
# Diagramy Feynmana - pętle

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



strzałki – tu przepływ ład. el. (ujemnego)

- Poprawki kwantowe to również **pętle**



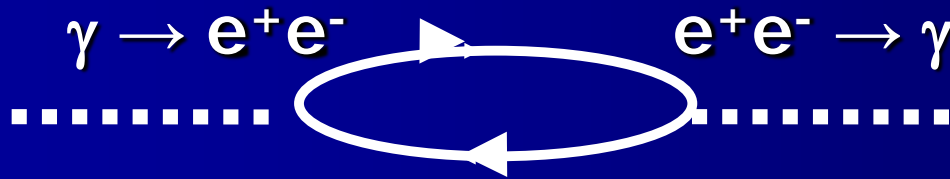


# Cząstki wirtualne

Mechanika kwantowa pozwala na istnienie cząstek z niedostępnymi energiami (tzn. niezgodnymi z zasadą zachowania energii), ale przez krótki czas zgodnie z

zasadą Heinsenberga:  $\Delta E \sim 1/\Delta t$

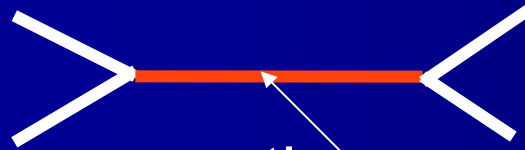
Np. elektrony mogą mieć zerową, ujemną energię lub bardzo dużą energię. Wtedy procesy kreacji i anihilacji par możliwe → a więc np. pętle



Cząstki wirtualne to są cząstki dla których  $E^2 \neq p^2 + m^2$  ( $c=1$ ) (cząstki „poza powłoką masy”) - istnieją krótko i nie są obserwowane bezpośrednio

# Cząstki wirtualne = wewnętrzne

Przykład: W zderzeniu dwóch cząstek  $a, b$   
produkowane są dwie cząstki  $c, d$ :  $a+b \rightarrow c+d$



cząstka wewnętrzna = **wirtualna**

Dzięki cząstkom wirtualnym:

- uwzględniamy interferencję (jeśli w zderzeniu  $ab$  produkcja  $cd$  możliwa jest na dwa sposoby, to jak przechodzenie światła przed dwie szczeliny)
- możliwe jest np. rozpraszanie światła na świetle

$\gamma \quad \gamma \rightarrow \gamma \gamma$   
(fotony jako  
cząstki neutralne

nie oddziałują wprost ze sobą)

*pośredniczą cząstki naładowane*

*w pętli np. elektron*

# Amplitudy prawdopodobieństwa i prawdopodobieństwa procesów

- Jeżeli znamy własności cząstek i sprzężeń możemy obliczyć 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 prawdopodobieństwa**  
**nie samych 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.
- Występują cząstki wirtualne (o różnych energiach) z dowolnie wielkimi energiami. Sumowanie po wkładach od takich cząstek może prowadzić do nieskończonego prawdopodobieństwa badanego procesu.
- Pytanie: czy wkłady od takich procesów z wirtualnymi cząstkami daleko poza powłoką masy są jakoś tłumione? Nierzaz nie są ...

# Tłumienie wkładu od pętli

- Zwykle tłumienie większe dla cząstek bardziej wirtualnych (*bardziej poza powłoką masy*)
- Tłumienie zależy od typu cząstki, szczególnie istotny jest spin cząstki wirtualnej  
*(W procesach zachowuje się całkowity moment pędu: jeżeli w stanie początkowym występuje 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 -renormalizacja

- QED: problem z fotonem (spin 1 )? – nieskończone wkłady od różnych diagramów QED kasują się, co wykazali w 1948 Feynman, Tomonaga, Schwinger (Nobel 1964)

QED prowadzi do skończonych przewidywań - bardzo precyzyjnych przewidywań, np. dla anomального momentu magnetycznego mionu

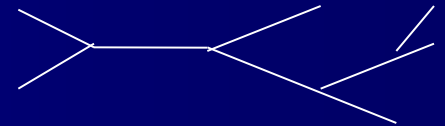
→ patrz poniżej

- Dla oddziaływań słabych z bozonami W i Z (też spin 1) – problem jest większy, ale uwzględnienie nowych oddziaływań i nowych diagramów pomaga

→ patrz poniżej

# Rachunek zaburzeń

- Przewidywania teoretyczne dla określonego procesu: 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 mała stała sprzężenia

$$\alpha = e^2 / (4 \pi) \sim 1/137$$

i następny człon w szeregu prop. do  $\alpha^2$  – mały około 1%

- Rachunek zaburzeń (r.perturbacyjny) - im więcej wyrazów w szeregu uwzględnimy (wyrazów wyższego rzędu w stałej sprzężenia, czyli potęg stałej sprzężenia), tym większa precyzja przewidywań teorii

# Anomalny moment magnetyczny mionu

(lub  $g-2|_\mu$ )

w oparciu o Jegerlehner, Eidelman, J. Miller 2006-7

Dla cząstki fund.  
o spinie  $\frac{1}{2}$   
najprostszy akt  
oddziaływania  
z polem e-m  
 $\rightarrow g=2$

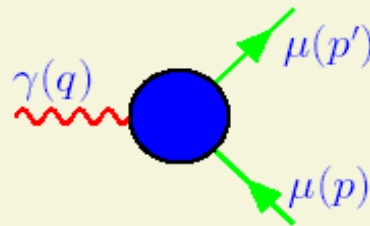
$(g-2)_\mu$

## ① The Anomalous Magnetic Moment of the Muon

$$\vec{\mu} = g_\mu \frac{e\hbar}{2m_\mu c} \vec{s} ; \quad g_\mu = 2(1 + a_\mu)$$

Dirac:  $g_\mu = 2$  ,  $a_\mu$  muon anomaly

Stern, Gerlach 22:  $g_e = 2$ ; Kusch, Foley 48:  $g_e = 2(1.00119 \pm 0.00005)$



$$= (-ie) \bar{u}(p') \left[ \gamma^\mu F_1(q^2) + i \frac{\sigma^{\mu\nu} q_\nu}{2m_\mu} F_2(q^2) \right] u(p)$$

$$F_1(0) = 1 ; \quad F_2(0) = a_\mu$$

$a_\mu$  responsible for the Larmor precession

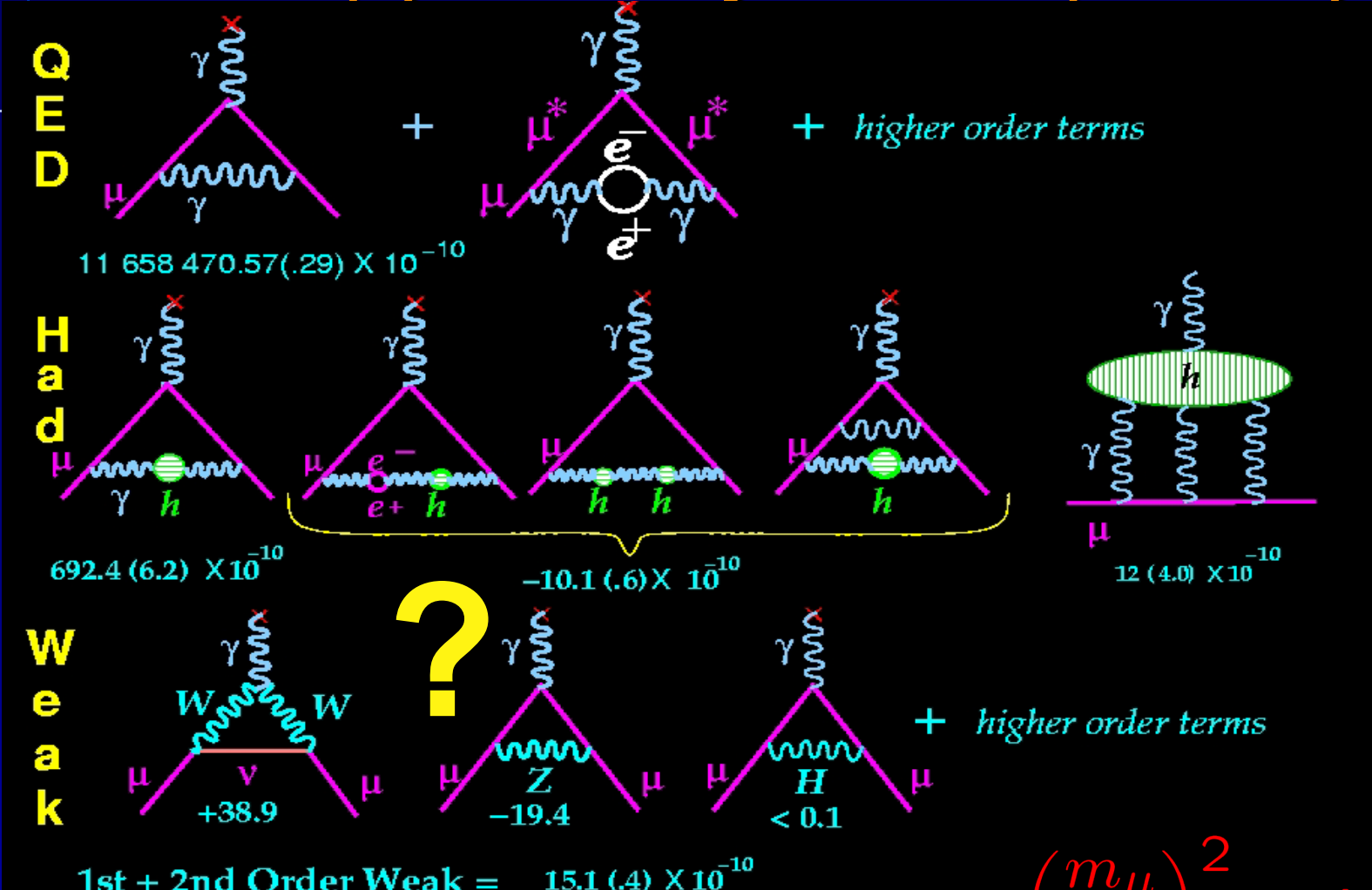
directly proportional at magic energy  $\sim 3.1$  GeV

CERN, BNL g-2 experimen

$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{m} \left[ a_\mu \vec{B} - \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{\beta} \times \vec{E} \right]_{E \sim 3.1 \text{ GeV}} \underset{\text{at "magic } \gamma}{\simeq} \frac{e}{m} \left[ a_\mu \vec{B} \right]$$



# Model Standardowy: wkłady pętlowe QED, od hadronów (h) i oddziaływań EW (W/Z i H)

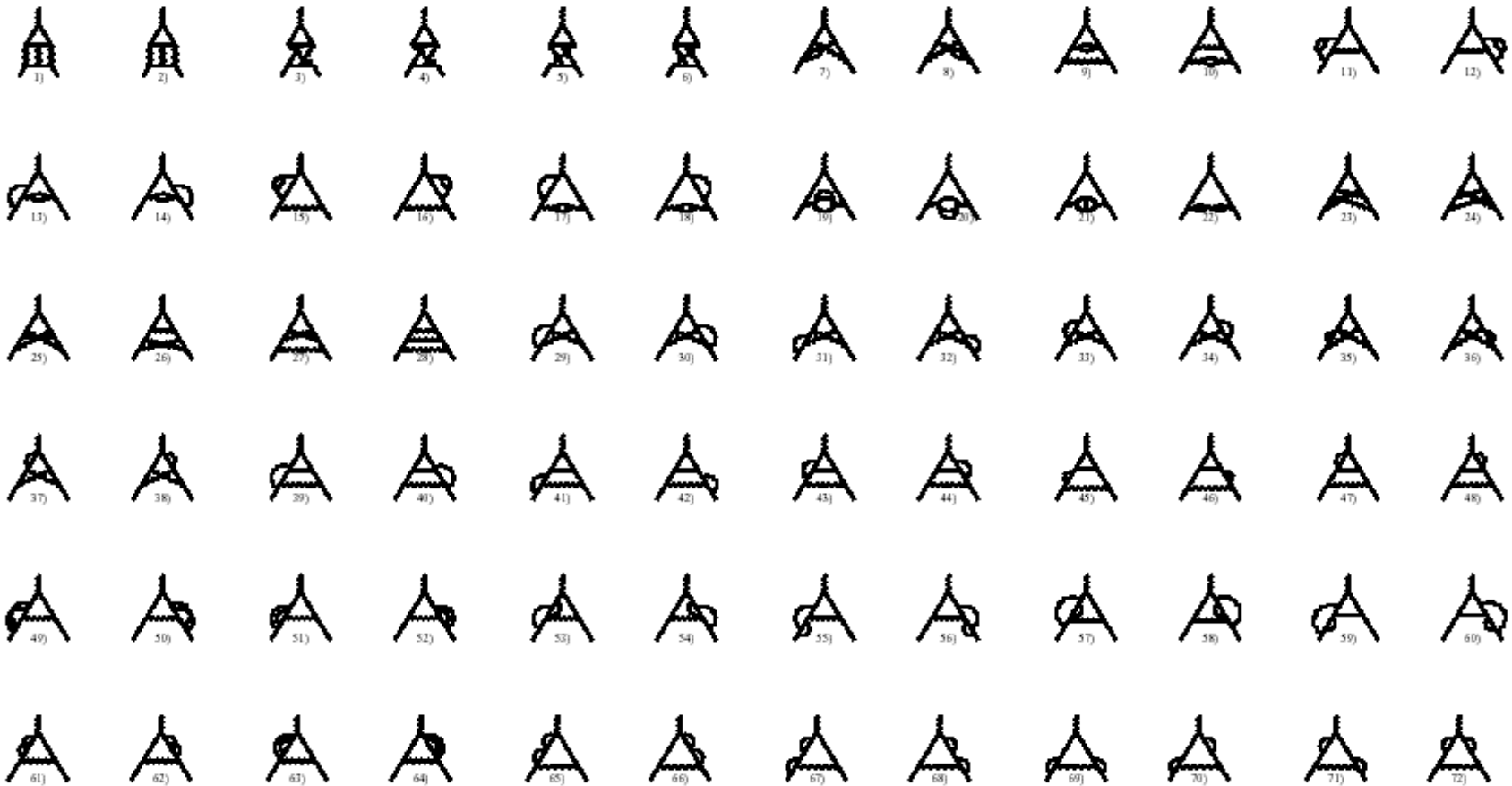


e vs.  $\mu$ : relative contribution of heavier things

$$\left(\frac{m_\mu}{m_e}\right)^2 \simeq 40,000$$

# 3 rd order QED contributions

3-i rząd szeregu perturbacyjnego QED dla  $g=2$



## QED Contribution $a_\mu^{\text{QED}}$

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

Terms up to  $\alpha^3$  are known analytically, a recent more accurate numerical calculation of the  $\alpha^4$  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/  $\alpha$

# $g-2|_{\mu}$ : dane-teoria (MS)

## Jegerlehner'07

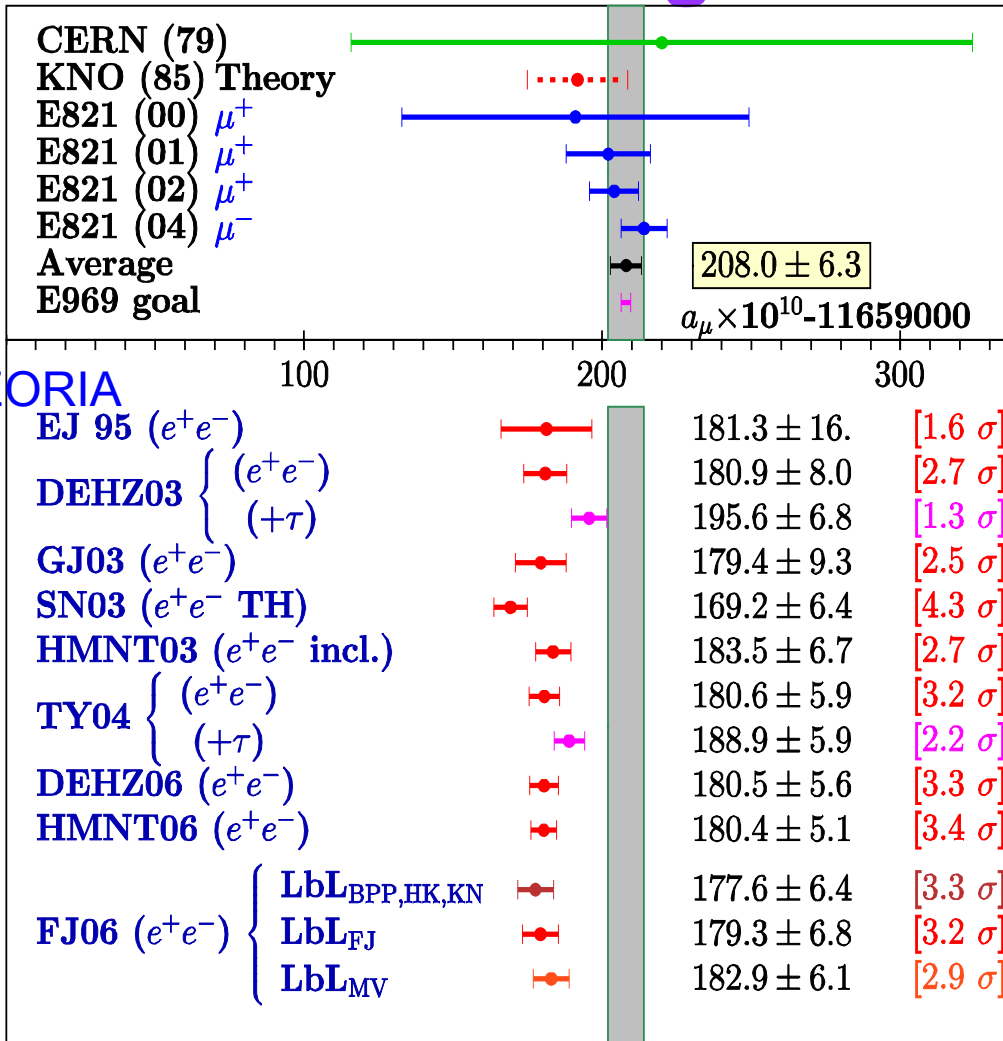
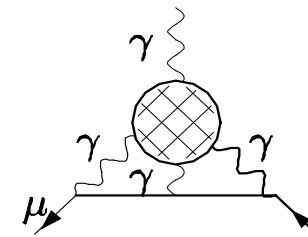
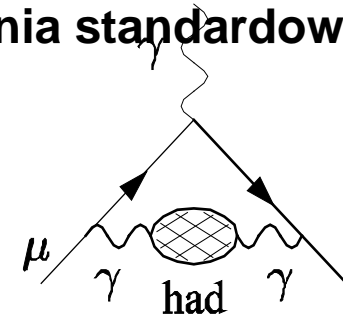
New Physics?

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

niezgodność na poziomie 3.2

odchylenia standardowego

(3.2  $\sigma$ )



DANE

TEORIA

The BNL muon storage ring



[www.g-2.bnl.gov](http://www.g-2.bnl.gov)

Małe, b. precyzyjne doświadczenie przy niskich energiach - [www.g-](http://www.g-2.bnl.gov)

# Idea renormalizacji

- QED: nieskończoności występują tylko w kilku wyrażeniach, związanych z masą i ładunkiem elektrycznym mionu.

Posługując się wielkościami mierzonymi w doświadczeniu, pozbywamy się nieskończoności w następujący sposób:

Niech  $A$  -wyrażenie dla wielkości fizycznej, poprawka pierwszego rzędu  $\Delta$  zawiera nieskończony wkład  $\Delta'$  (sparametryzowany np.  $\sim \Lambda \rightarrow \infty$ ),

$$A = e_0(1 + \Delta) + \Delta'' = e_0(1 + \Delta')(1 + \Delta'' + \dots) = e_{\text{fiz}}(1 + \Delta'' + \dots),$$

czyli przewidywania dla wielkości fiz.  $A$  skończone ( $\Delta''$  - skończone,  $e_{\text{fiz}}$  - też)  
(+... wyrazy wyższego rzędu w ładunku elektrycznym)

Przykład: nieskończoności nie ma w końcowych wyrażeniach dla anormalnego momentu magnetycznego mionu. Występują na etapach pośrednich i są takie same w wyrażeniach dla ładunku elektrycznego jak i momentu magnetycznego. Możemy wyrazić jedno przez drugie, a dla ładunku elektrycznego przyjąć wartość doświadczalną...

# Trik bardzo skuteczny

## nazwa uczona: renormalizacja

- Ładunek elektryczny jest wolnym (wyjściowym) parametrem QED, masa elektronu  $m_e$  – też.
- Skoro teoria nie przewiduje wartości tych parametrów – to możemy w nich „ukryć” nieskończoności
- Jeżeli nieskończoności tylko w wyrażeniach dla wolnych parametrów teorii → teoria renormalizowalna

# Renormalizacja działa dobrze

choć świadczy o niedoskonałości teorii

- Dobrze, że można kłopotliwe człony wyizolować i powiązać z pomiarami parametrów
- Tak skonstruowana teoria QED w bardzo dobrej zgodności z danymi  
*(porównaj wyniki dla  $g-2$ )*



# Nierenormalizowalność

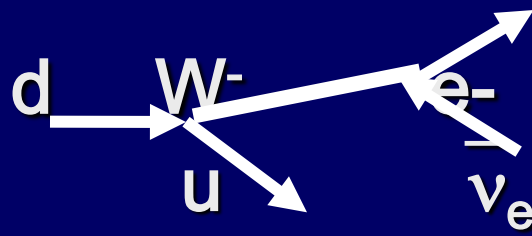
- Są teorie z nieskończonościami zawartymi nie tylko w wolnych parametrach
- Długo sądzono, że teorie z cząstkami o spinie 1, ale innymi niż foton, są nierenormalizowalne
- Dziś wiemy, że są renormalizowalne teorie z cząstkami o spinie 1 – o ile są to teorie z cechowaniem (**gauge theories**), dokładnie  
→ teorie nieprzemienne (Yanga-Millsa)

Poniżej zbadamy tłumienie dla dużych energii dla oddziaływań elektroślabych

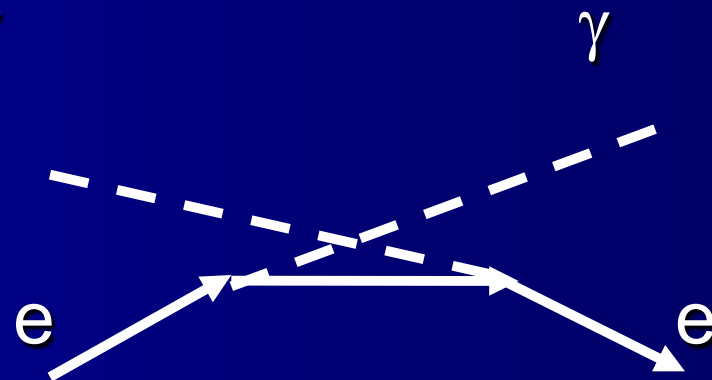
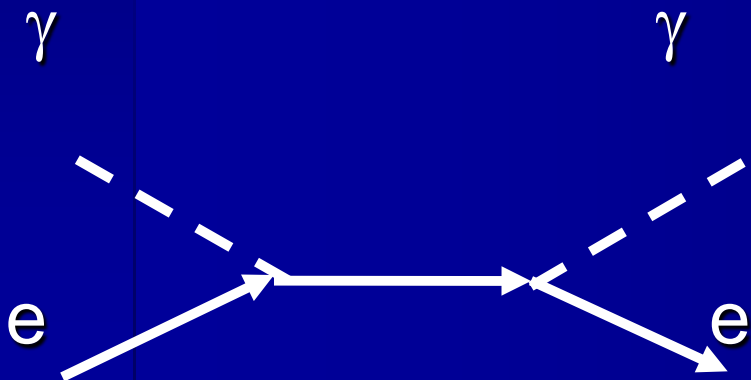
Grawitacja to teoria z cechowaniem, ale nierenormalizowalna

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

Oddziaływania elektrosłabe (EW)



- $W$  jest bardzo masywne (80.4 GeV), więc w tym rozpadzie kwarku  $d$  (masa  $\sim$  MeV) bozon  $W$  jest bardzo wirtualny, daleko poza powłoką masy (rozpad  $d (W^-)$  i rozpad  $\bar{d} (W^+)$ )
- $W$  ma spin 1  $\rightarrow$  kłopoty z renormalizowalnością
- Aby dokładnie przedyskutować ten problem najpierw przeanalizujemy rozpraszanie Comptona  $\gamma e \rightarrow \gamma e$  (QED), są tu dwa diagramy:



# Zachowanie teorii dla dużych energii

- Źle, jeśli prawdopodobieństwo procesów rośnie z energią, gdyż może przekroczyć 1 (100%)
- Rozpraszanie Comptona – każdy diagram daje wkład rosnący z energią, ale suma diagramów – OK (kasowanie)
- Kasowanie wynika ze struktury teorii (symetria cechowania)

Obliczenia prawdopodobieństw wg. reguł Feynmana

# Reguły Feynmana

Każdej linii i wierzchołkowi w diagramach Feynmana przypisujemy określony czynnik. Tu śledzimy tylko energię  $E$ .

- Wchodzący lub wychodzący foton (w danym procesie) (i każda cząstka wektorowa o **spinie 1**) – czynnik  $E$   
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  $1/E^2$

**Mnożymy czynniki  $\rightarrow$  amplituda prawdopodobieństwa  $A$**   
**(prawdopodobieństwo =  $|A|^2$ )**

# Proces Comptona dla dużych E

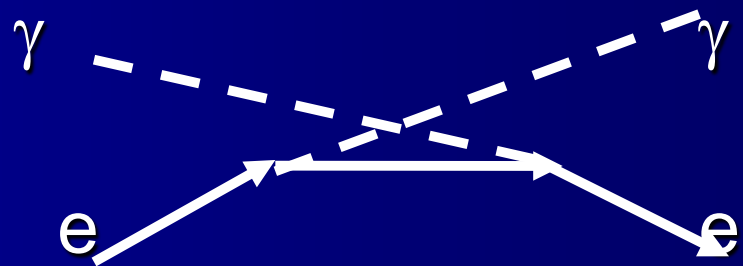
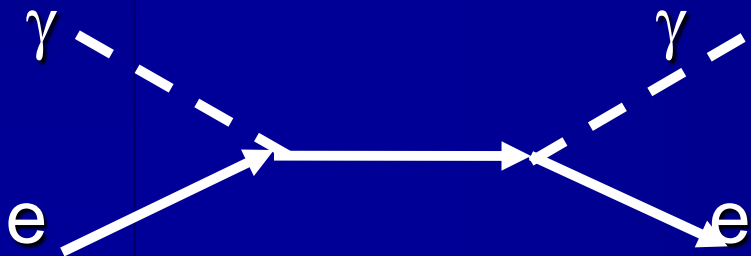
Dla tego procesu amplituda rośnie z energią jak

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

(zaś prawdopodobieństwo  $E^4$ )

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

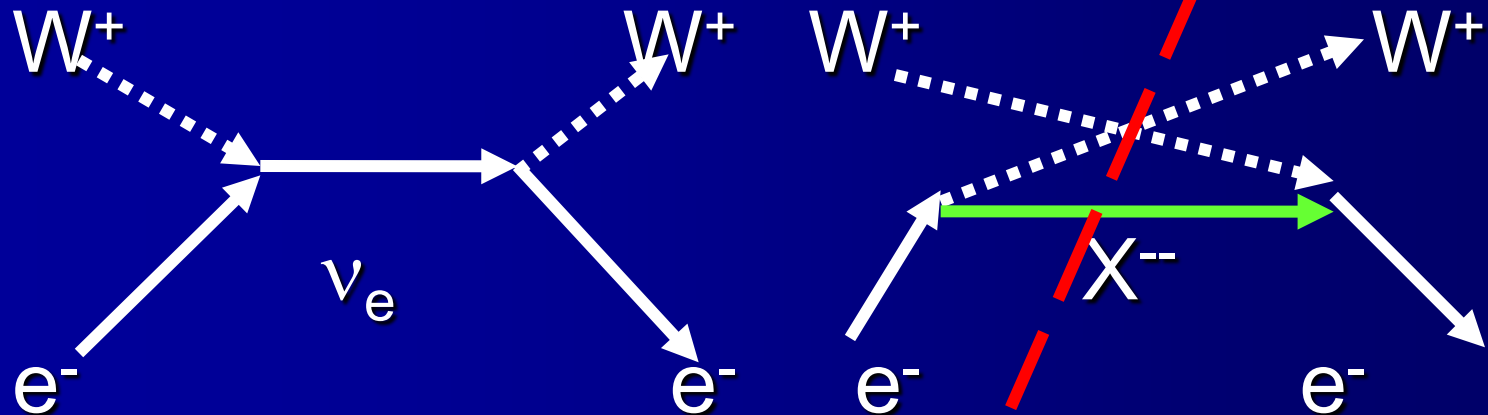
$\gamma e \rightarrow \gamma e$



# Rozpraszanie bozonów W

Tu strzałki na liniach W  
oznaczają pędy

## ■ Zastępując $\gamma$ przez W



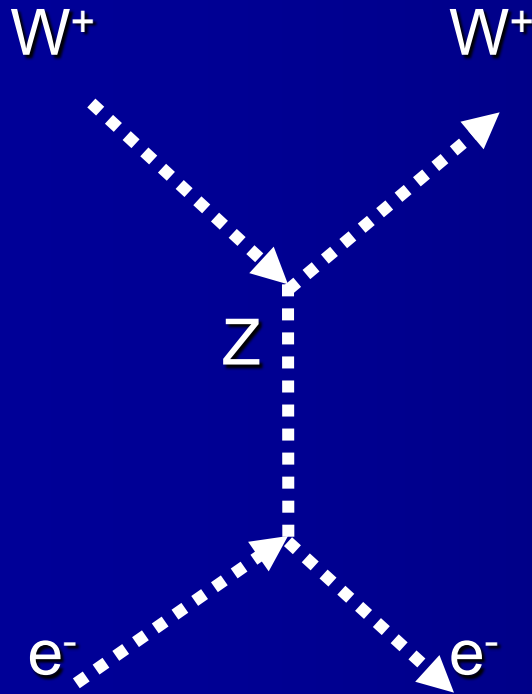
Zachowanie ładunku:  $X^{--}$  podwójnie naładowana

cząstka: **ale taka cząstka nie istnieje!**

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

# Neutralny bozon Z konieczny!

- Uwzględniając diagram z bozonem Z



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

# Cena za dobre zachowanie dla dużych E: „nowa” cząstka bozon Z z określonym oddziaływaniem

Znaleziono ją – to bozon Z !

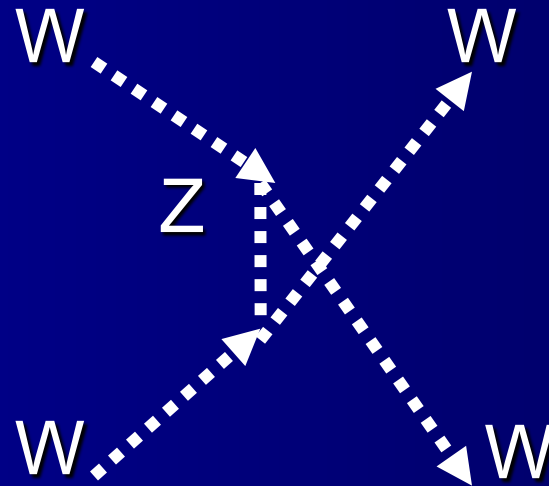
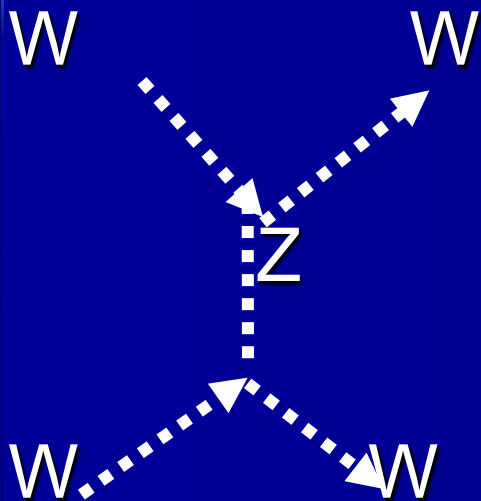
→ sukces teorii



# Rozpraszanie bozonów $W$ na sobie

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

- Procesy z samymi bozonami  $W$  :  $WW \rightarrow WW$



Nowy typ procesu  
(samoodziaływanie bozonów  $W$ )  
kasowanie  $E^4$  ale nie  $E^2$

# Człon $E^2$ to w istocie to człon $E^2 M^2$

- Z analizy wymiarowej wynika, że w amplitudzie pozostają człony typu  $E^2 M^2$   
(M- masa bozonów W lub Z)
- Musimy więc dodać jakiś wkład tak aby te człony usunąć: najprostszy diagram z wymianą cząstki o spinie 0 sprzęgającej się odpowiednio do W i Z (bozon H)

# Rozpraszanie bozonów W na sobie

## - wkład od H



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

**dobre zachowanie dla procesu  $WW \rightarrow WW$**

# Koniec?

- Potrzeba istnienia cząstki H - sprzęgającej się do każdej cząstki masywnej
- Znaleziona w 2012!
- Masa ok. 125 GeV
- Teoria oddziaływań EW –renormalizowalna, znaleźliśmy cząstkę H i zamykamy teorię (Model Standardowy) (?)

# Generacja mas?

- 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 tej analizy prawdopodobieństw dla rozpraszania  $WW \rightarrow WW$

- Masy- więc oczekiwany związek z grawitacją (i strukturą Wszechświata) - *o tym później*

# „The theory ends here” -

Veltman

- Samooddziaływanie 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  $\gamma\gamma$ ,  $e\gamma$ )  
We got help (2012)!

- Czy fakt rozpadu cząstki zależy od układu odniesienia?
- Czy cząstka swobodna i cząstka na powłoce masy to to samo?
- Dlaczego swobodny pozyton nie może wypromieniować foton i pozostać na powłoce masy?
- Co to jest cząstka wirtualna?
- Każdemu diagramowi Feynmana odpowiada określona amplituda prawdopodobieństwa  $A$  opisującą przejście od stanu początkowego do końcowego. Jeśli kilka diagramów (kanałów procesu) jest możliwych to ile wynosi całkowite prawdopodobieństwo procesu: suma  $|A|^2$  czy  $|\sum A|^2$  ?
- Czy elektrodynamika kwantowa prowadzi do nieskończonych wyrażeń na etapach pośrednich?
- Porównaj wielkość poprawki jedno- i dwupętlowej QED dla anomalnego momentu magnetycznego mionu
- Ile wynosi różnica anomalnego momentu magnetycznego dla mionu między doświadczeniem a przewidywaniami teoretycznymi Modelu Standardowego?
- Kiedy teoria jest renormalizowalna?
- Poprawne zachowanie dla bardzo dużych energii prawdopodobieństwa procesów EW wymaga istnienia cząstki o spinie 0 (skalarnej). Jak taka cząstka sprzęga się do bozonów Z?

Podkreślone pytania nie obowiązują

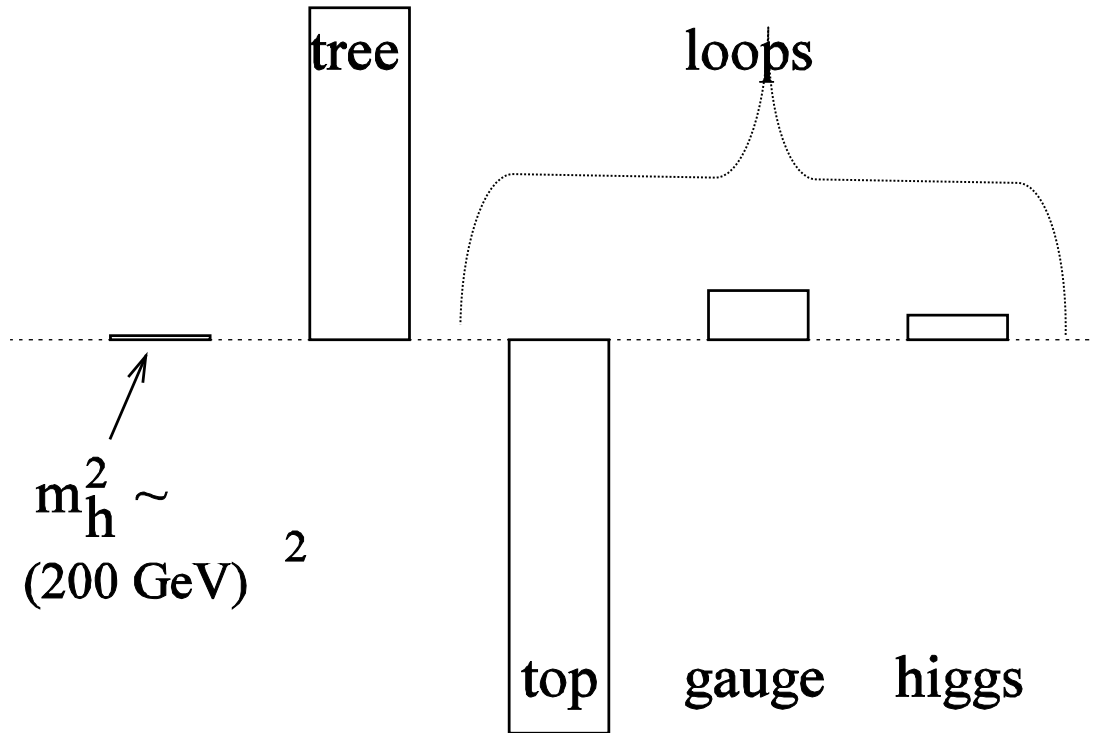
# Problemy Modelu Standardowego

- Wiele parametrow (np.masy )
- Dlaczego trzy rodziny?
- Niezerowa masa neutrin
- Problem hierarchii- poprawki kwantowe  
 $M_H(125 \text{ GeV}) \ll M_{\text{Planck}} (10^{19} \text{ GeV})$
- Grawitacja?
- Opisuje 4 % wszechświata – brak kandydatów na ciemną materię

Odstępstwa od Modelu? I czy to jest Higgs?



# Fine tuning



Wysokość prostokątów odpowiada wielkości wkładów

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*)