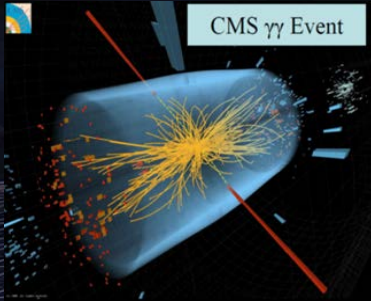


# Wszechświat cząstek elementarnych



## WYKŁAD 9

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

# Opis zdarzeń

- Efekty relatywistyczne i kwantowe.  
Procesy powstawania, znikania cząstek oraz ich mieszanie i rozpady → formalizm **Kwantowej Teorii Pola (Quantum Field Theory, QFT)**  
*(zastosowana już w kwantowej elektrodynamice)*
- Technika obliczeniowa QFT
  - rachunek zaburzeń:  
najniższy rząd rachunku zaburzeń i poprawki  
*poprawki kwantowe: drzewa (trees) i pętle (loops)*
  - język obrazkowy (diagramy Feynmana)

# Teoria cząstek elementarnych

- 1948 – nowa faza mechaniki kwantowej (kw. teorii pola) precyzyjne pomiary wymagały precyzyjnych obliczeń
  - Metoda Feynmana: diagramy i reguły Feynmana obliczeń to dziś uniwersalne narzędzie fizyki cząstek
    - pierwsze zastosowanie w elektrodynamice kwantowej (QED)*
  - QED opisuje oddz. elektronów z fotonami. Trudności bo poprawki kwantowe **nieskończone**. Sposób „usunięcia” nieskończoności → **procedura renormalizacji**
  - Oddziaływania słabe – jeszcze większe TRUDNOŚCI. Propozycja: **nowe oddziaływanie, nowe cząstki** → teoria oddz. elektroslabych z bozonami W/Z i cząstką **Higgsa renormalizowalna** (poddająca się renormalizacji)
- Nagroda Nobla: Glashow, Salam, Weinberg 1979 (W/Z)  
t’Hooft, Veltman 1999 (renormalizowalność)

# **Efekty relatywistyczne**

## **- cząstki swobodne i wirtualne**

# Efekty relatywistyczne

## (szczególna teoria względności)

- Szczególna teoria względności Einsteina opiera się o postulaty:
  - Niezmienniczości relatywistycznej praw względem zmiany układu odniesienia (dla układów poruszających się ze stałą prędkością)
  - Stałą prędkość światła w układach odniesienia poruszających się ze stałą prędkością względem siebie (*bardzo nieintuicyjne*)
- Istotna rola pomiaru → transformacja Lorentza wiąże pomiary w różnych układach odniesienia (analog transf. Galileusza)
- Najbardziej bezpośredni przejaw efektów relatywistycznych - czas życia cząstek poruszających się z prędkościami bliskimi prędkości światła -> dłuższy czas życia cząstki w ruchu (*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 to **skrócenie długości (Lorentza)**

# Niezmienność Lorentza, niezmienność Poincare

- Niezmienność praw względem obrotów i zmiany układu odniesienia (poruszających się ze stałymi prędkościami) → **niezmienność Lorentza**

Niezmienność Lorentza plus niezmienność względem przesunięć w czasie i przestrzeni → **niezmienność Poincare**

**NIE WSZYSTKO JEST WZGLĘDNE!!**

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

- **Ale, do opisu nieraz wygodny pewien konkretny układ.**

# Zasada zachowania energii i pędu

- Dla wszystkich procesów rozpadów i rozpraszania cząstek swobodnych 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

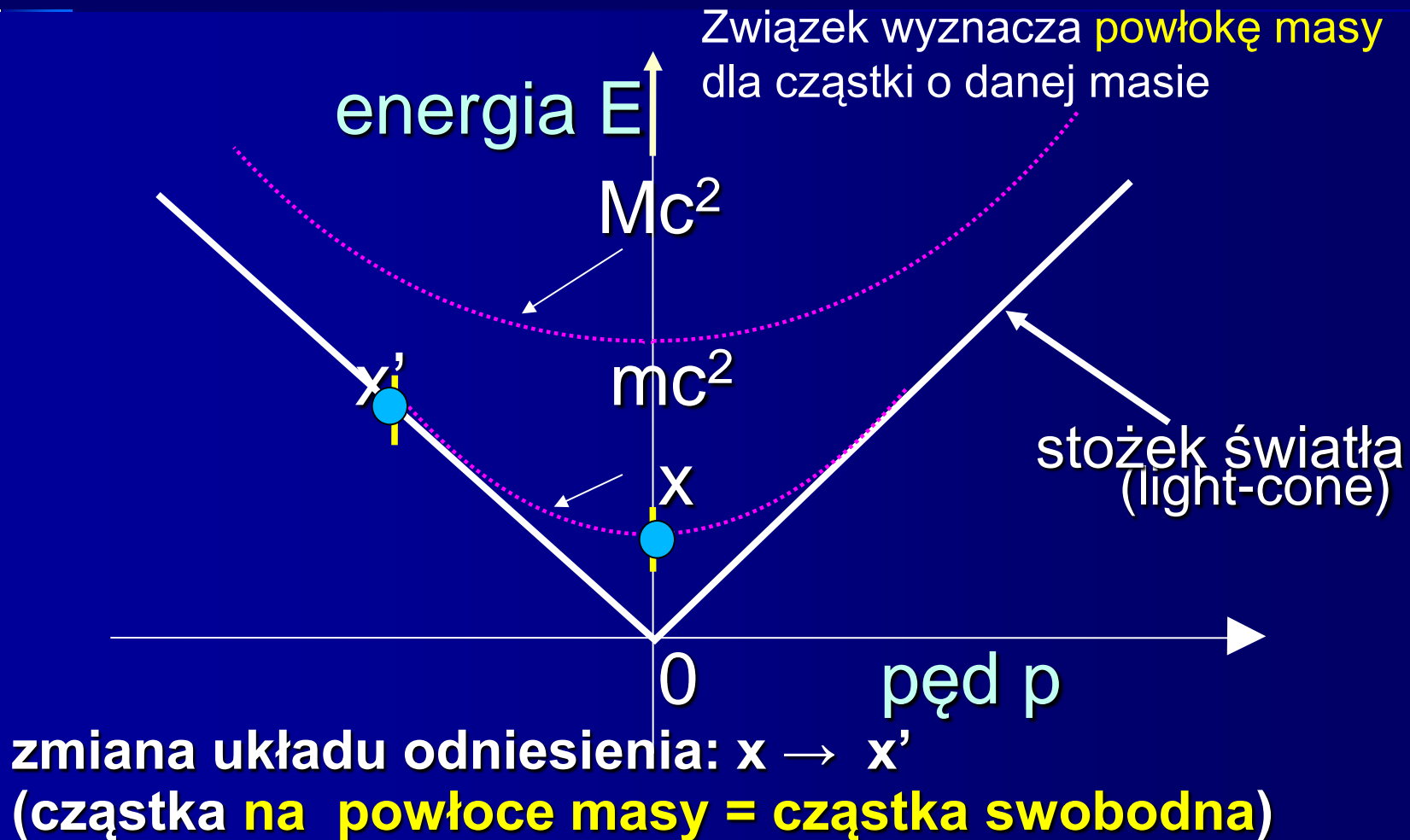
*Jest to możliwe dla elektronu w atomie, bo elektron przechodzi do niższego stanu. W materii emisja fotonów też jest możliwa  $\rightarrow$  promieniowanie hamowania (bremsstrahlung)*

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

*Ale w pobliżu jądra – możliwy bo są inni uczestnicy procesu*

# Energia i pęd dla cząstki *swobodnej*

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



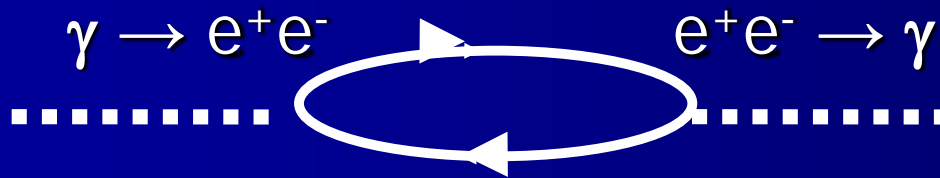


# Linie wewnętrzne w diagramach - cząstki wirtualne

Mechanika kwantowa dopuszcza istnienie

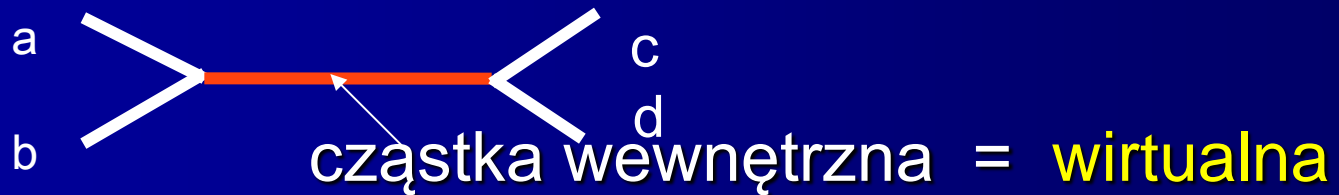
cząstek wirtualnych - są cząstki dla których  $E^2 \neq p^2 + m^2$  ( $c=1$ ) (cząstki „poza powłoką masy”) –

istnieją krótko i nie są obserwowane bezpośrednio,  
np. w pętlach



# Cząstki wirtualne - przykłady

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

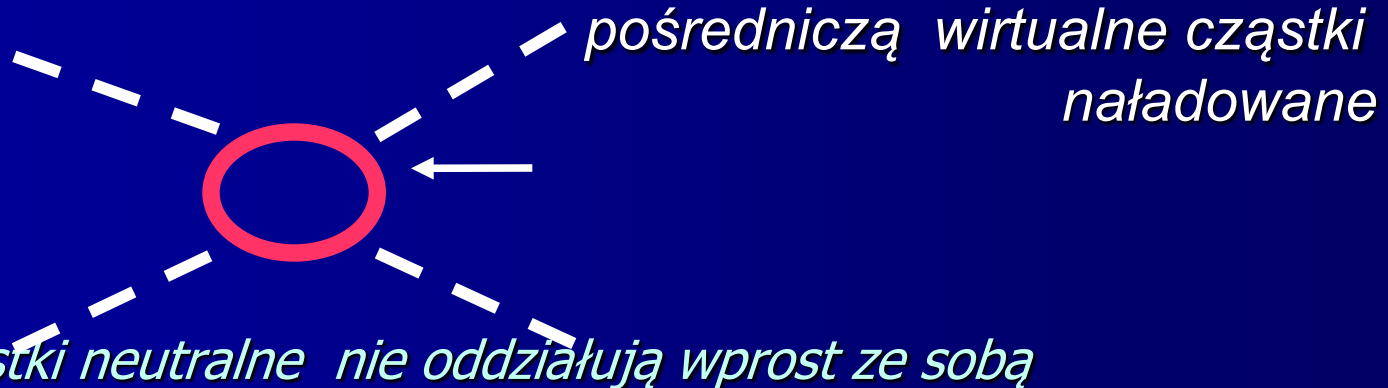


Dzięki cząstkom wirtualnym:

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

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

■



- *fotony jako cząstki neutralne nie oddziałują wprost ze sobą*

# Prawdopodobieństwo procesów

# Amplitudy prawdopodobieństwa i prawdopodobieństwa procesów

- Jeżeli znamy własności cząstek i ich sprzężeń możemy obliczyć prawdopodobieństwa procesów
- Cząstki początkowe wytwarzamy lub przygotowujemy, ale końcowe możemy tylko obserwować
- Musimy uwzględniać **interferencję amplitud**, gdyż z określonego stanu początkowego do określonego stanu końcowego przejście na wiele sposobów  
(*różne kanały procesu*)
- Diagramy Feynmana dla wszystkich kanałów procesu  
→ **sumujemy amplitudy prawdopodobieństwa a nie same prawdopodobieństwa**

*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? Nieraz nie są ...

# Tłumienie wkładu od pętli

- Zwykle tłumienie większe dla cząstek bardziej wirtualnych (*bardziej poza powłoką masy*)
- Tłumienie zależy również 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

## i renormalizacja

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

### procedura renormalizacji

(Kramers 1938)

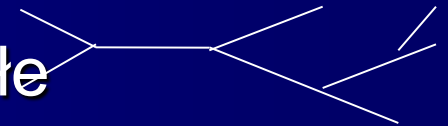
- QED prowadzi więc do skończonych przewidywań - bardzo precyzyjnych przewidywań, np. dla anomального momentu magnetycznego mionu

→ patrz dalej

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

# Rachunek zaburzeń

- Przewidywania teoretyczne dla określonego procesu: musimy sumować wkłady, w tym z wieloma wierzchołkami
- Ale to jest nieskończony szereg wyrazów...
  - radzimy sobie jeśli np. kolejne wyrazy małe  
(małe zaburzenia, inaczej perturbacje)



- Np. w QED mała stała sprzężenia

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

i następny człon w szeregu prop. do  $\alpha^2$  - wkład ok. 1%

- Rachunek zaburzeń (rachunek 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 dla mionu

# Anomalny moment magnetyczny mionu (inaczej $g-2|_{\mu}$ )

Moment magnetyczny  $\mu$  wiąże się ze spinem  $s$  cząstki

*spin i moment magn.*

*to są wielkości wektorowe*

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

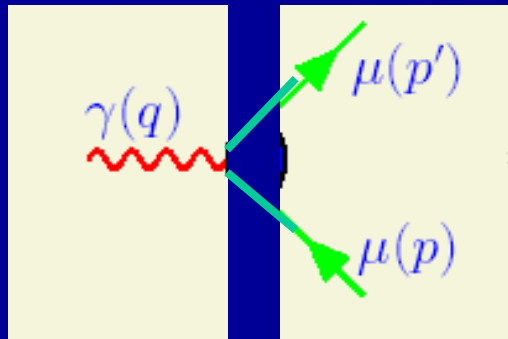
Dla cząstki fundamentalnych o spinie  $\frac{1}{2}$  najprostszy akt oddziaływania z polem (elektro)magnetycznym  $\rightarrow g=2$  stąd odstępstwo (czyli  $g-2$ ) nosi nazwę anomального momentu magnetycznego

Pierwsze pomiary dla elektronu w 1922! Potem -1948r

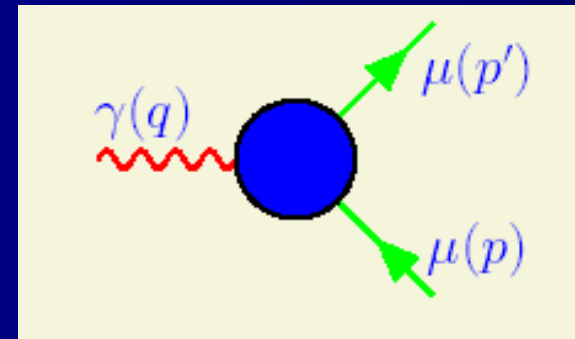
**Stern, Gerlach 22:**  $g_e = 2$ ; **Kusch, Foley 48:**  $g_e = 2 (1.00119 \pm 0.00005)$

# Skąd anomalia $a_\mu$ (dla mionu)?

Z dodatkowych oddziaływań ...



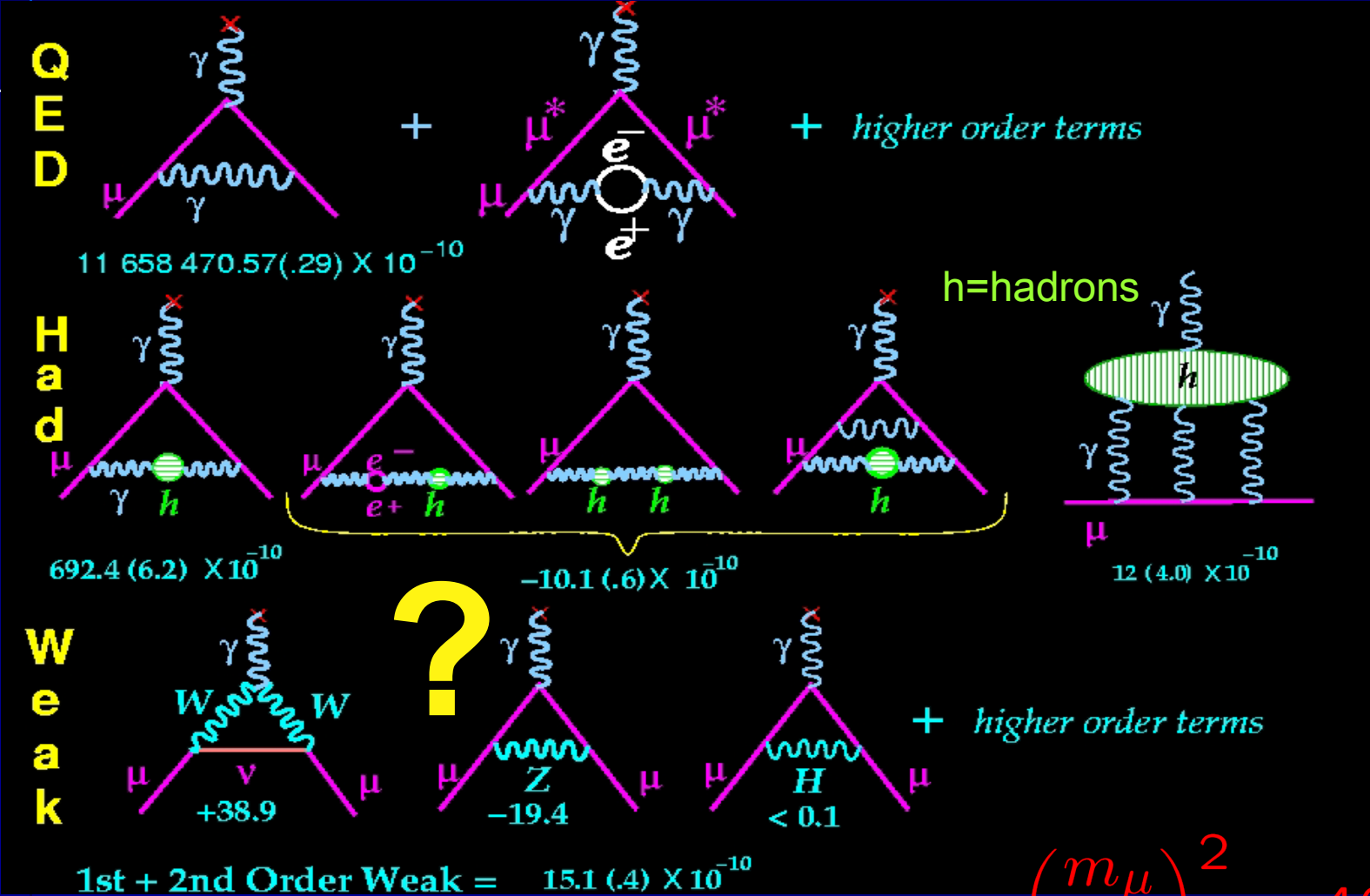
$g=2$  dla mionu  
gdy tylko takie sprzężenie  
(oddziaływanie)



$a=g-2 \neq 0$  dla mionu  
gdy więcej oddziaływań

foton z pędem  $q$ , mion z pędem  $p$ , mion z pędem  $p'$ ,  $p'=p+q$   
(dokładniej to są 4-pędy: (energia, 3-pęd))

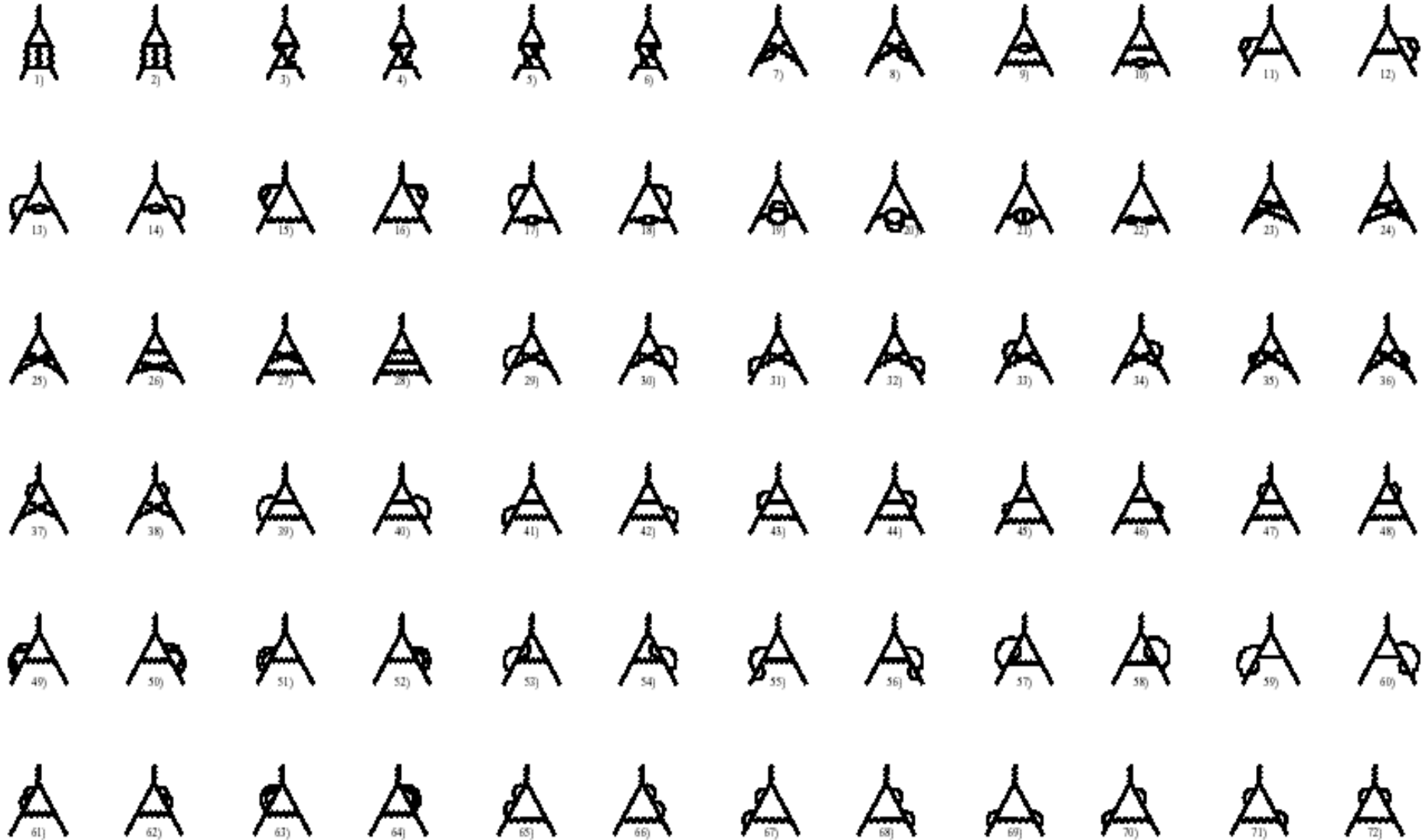
# Model Standardowy: wkłady QED, od hadronów (h) i oddziaływań EW (W/Z i H)



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

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

# 3-i rząd szeregu perturbacyjnego QED



## 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)

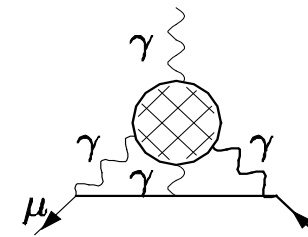
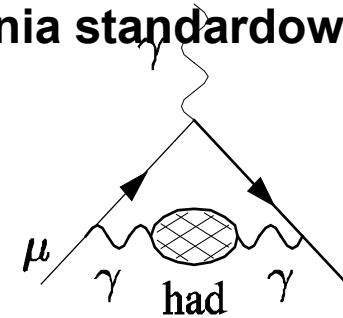
New Physics?

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

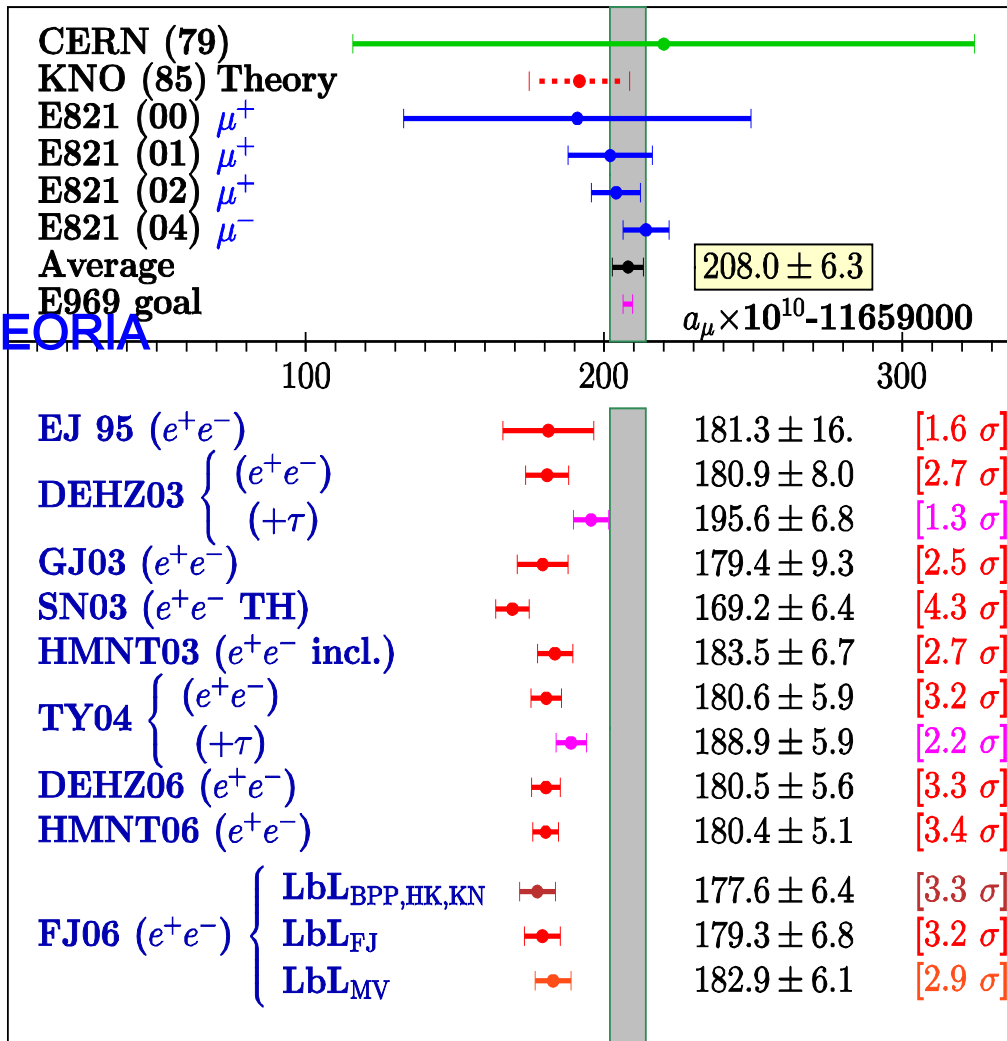
niezgodność na poziomie 3.2

odchylenia standardowego

(3.2  $\sigma$ )



DANE



# Nowe obliczenia teoretyczne w Modelu Standardowym (2013)

z pracy Dermisek, Rava – maj 2013

The discrepancy between the measured value of the muon anomalous magnetic moment [17] and the SM prediction,

**3.4  $\sigma$**

$$\Delta a_{\mu}^{exp} = a_{\mu}^{exp} - a_{\mu}^{SM} = 2.7 \pm 0.80 \times 10^{-9}, \quad (28)$$

Dane doświadczalne z Brookhaven z roku 2006

[17] G. W. Bennett *et al.* [Muon G-2 Collaboration], “Final Report of the Muon E821 Anomalous Magnetic Moment Measurement at BNL,” *Phys. Rev. D* **73**, 072003 (2006) [hep-ex/0602035].

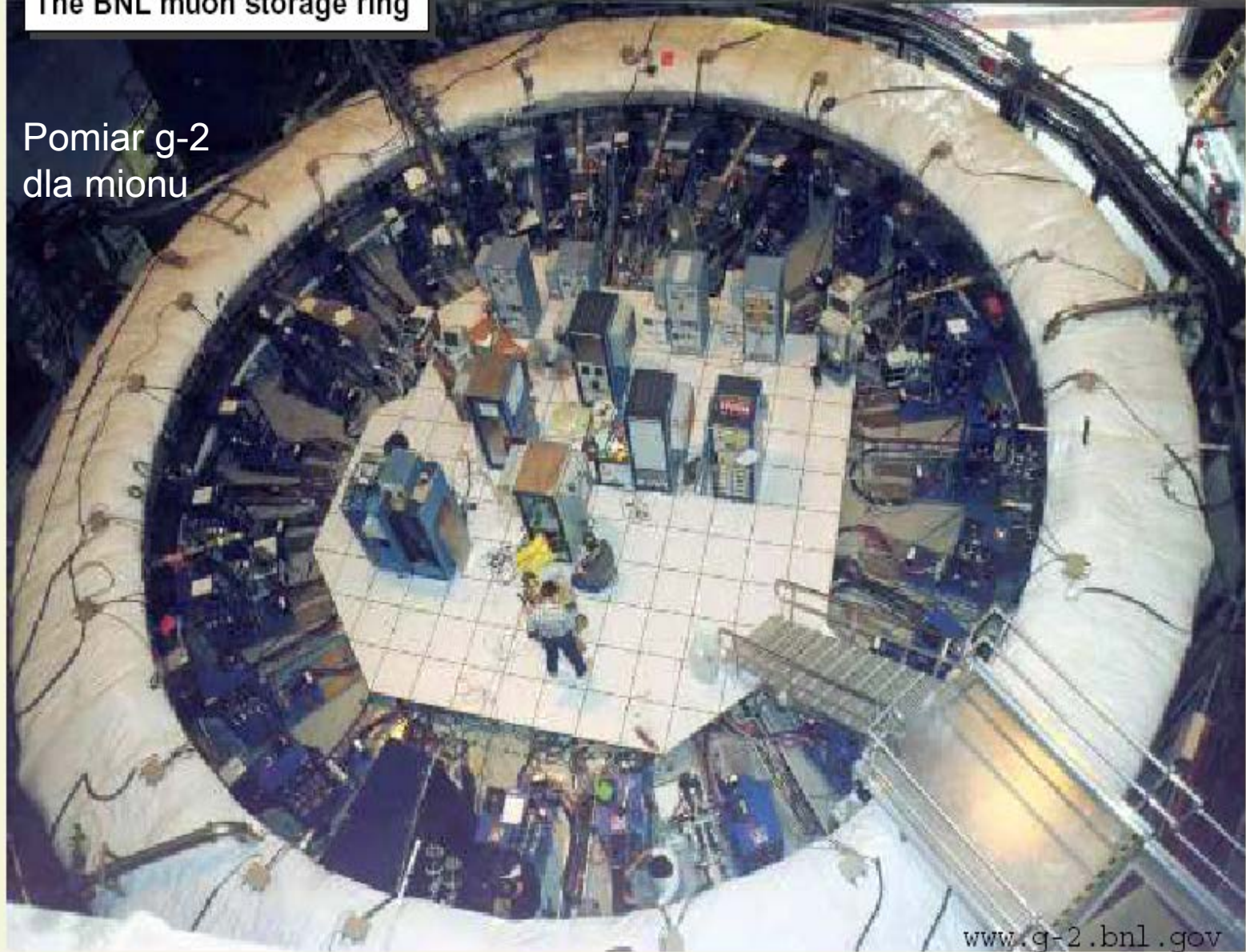


Brookhaven,  
USA

W lipcu br.  
urządzenie  
przetrans-  
portowano  
do  
Fermilabu  
(Chicago)  
<http://muon-g-2.fnal.gov/bigmove/>

The BNL muon storage ring

Pomiar  $g-2$   
dla mionu



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

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

# Renormalizacja

# Idea renormalizacji

## ■ Idea renormalizacji -

w QED nieskończoności występują tylko w kilku wyrażeniach, związanych z masą i ładunkiem elektrycznym. Posługując się wielkościami mierzonymi w doświadczeniu, pozbywamy się nieskończoności w następujący sposób:

A -wyrażenie dla wielkości fizycznej; niech poprawka pierwszego rzędu  $\Delta$  zawiera **nieskończony wkład**  $\Delta'$ ,

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

czyli przewidywania dla wielkości fiz. A skończone ( $\Delta''$  - **skończone**)

(+... wyrazy wyższego rzędu w ładunku elektrycznym)

Przykład: nieskończoności nie ma w końcowych wyrażeniach dla anormalnego momentu magnetycznego mionu ani elektronu. Występują na etapach pośrednich i są takie same w wyrażeniach dla ładunku elektrycznego jak i momentu magn. 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
- Teoria nie przewiduje wartości tych parametrów – to możemy w nich „ukryć” nieskończoności
- Jeżeli nieskończoności tylko w wyrażeniach dla wolnych parametrów teorii → **teoria jest renormalizowalna i prowadzi do określonych przewidywań dla procesów fizycznych**

# Renormalizacja działa dobrze

choć świadczy o niedoskonałości teorii

- dobrze, że można kłopotliwe człony wyizolować i powiązać z pomiarami fizycznych parametrów
- Problemy teorii typu QED:
  - teoria jedynie perturbacyjna
  - występują nieskończoności  
(choć można je izolować)

Tak skonstruowana teoria QED  
w bardzo dobrej zgodności z danymi

*wyniki dla  $g-2$  - najdokładniejsze pomiary i obliczenia w fizyce cząstek!!!*

# 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 można mieć renormalizowalne teorie z cząstkami o spinie 1 – o ile są to teorie z cechowaniem (**gauge theories**), dokładnie  
→ **teorie nieprzemienne (teorie Yanga-Millsa)**  
Dalej przeanalizujemy sektor elektroslaby

*Grawitacja inna: to teoria z cechowaniem, ale nierenormalizowalna*

# Symetria nieprzemienne → asymptotyczna swoboda

- Dla grup symetrii nieprzemiennej (tzn. takich dla których wynik dwóch kolejnych przekształceń zależy od kolejności ich wykonywania), jak SU(2) czy SU(3), bozony cechowania są „naładowane” i oddziałują ze sobą
- To powoduje, że „siła” sprzężeń maleje wraz z wzrostem energii oddziaływania i maleniem odległości między cząstkami (odwrotnie niż dla oddz. e-m) - **asymptotyczna swoboda** (np. dla kwarków)

Wiemy już, że

- to dzięki temu rachunek zaburzeń możliwy dla oddziaływań kwarków w LHC
- ale to też prowadzi do **uwięzienia kwarków**- dlatego w LHC zderzenia protonów, a nie kwarków

# Przewidywania dla dużych energii



# Prawdopodobieństwo procesów dla dużych energii

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

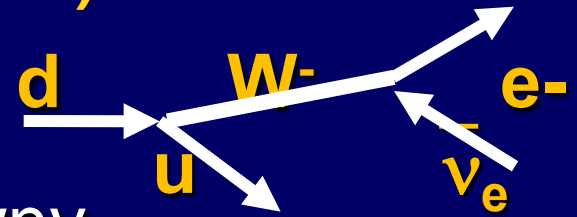
# Obliczenia prawdopodobieństw- reguły (gry) Feynmana

- 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 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 bozon  $W$  sprzęgający się do dwóch rzeczywistych (na powłoce masy) cząstek z obu końców – czynnik  $1/E^2$

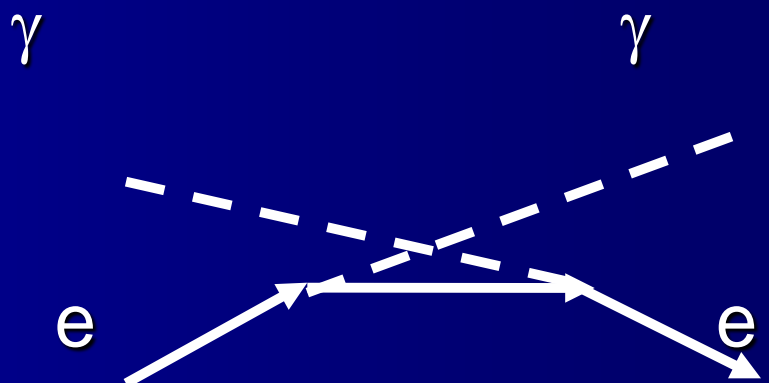
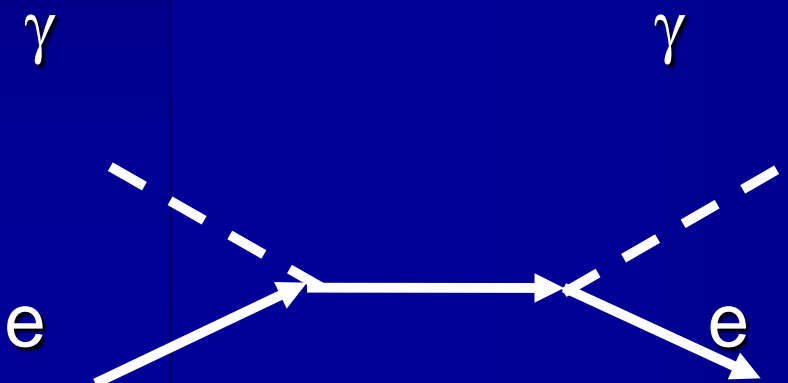
**Mnożymy czynniki** → **amplituda prawdopodobieństwa  $A$**   
**(prawdopodobieństwo =  $|A|^2$ )**

# Oddziaływania elektroslabe (EW)

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



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



# Gramy: obliczamy amplitudę dla procesu Comptona w oparciu o reguły Feynmana

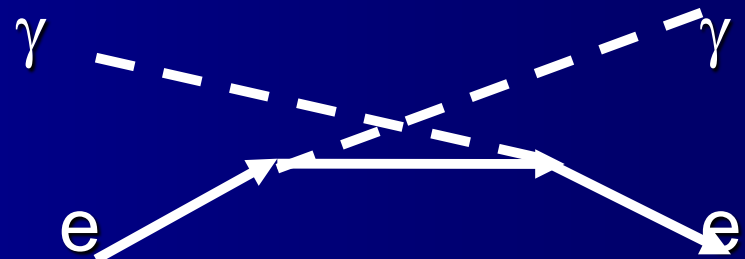
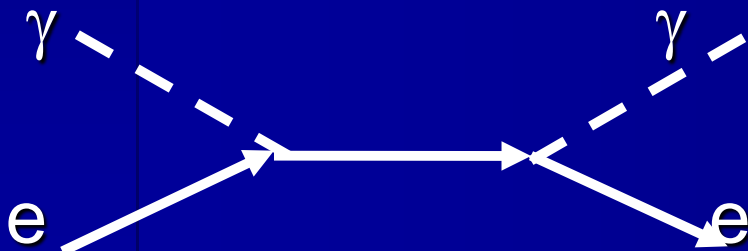
Dla tego procesu amplituda rośnie z energią jak

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

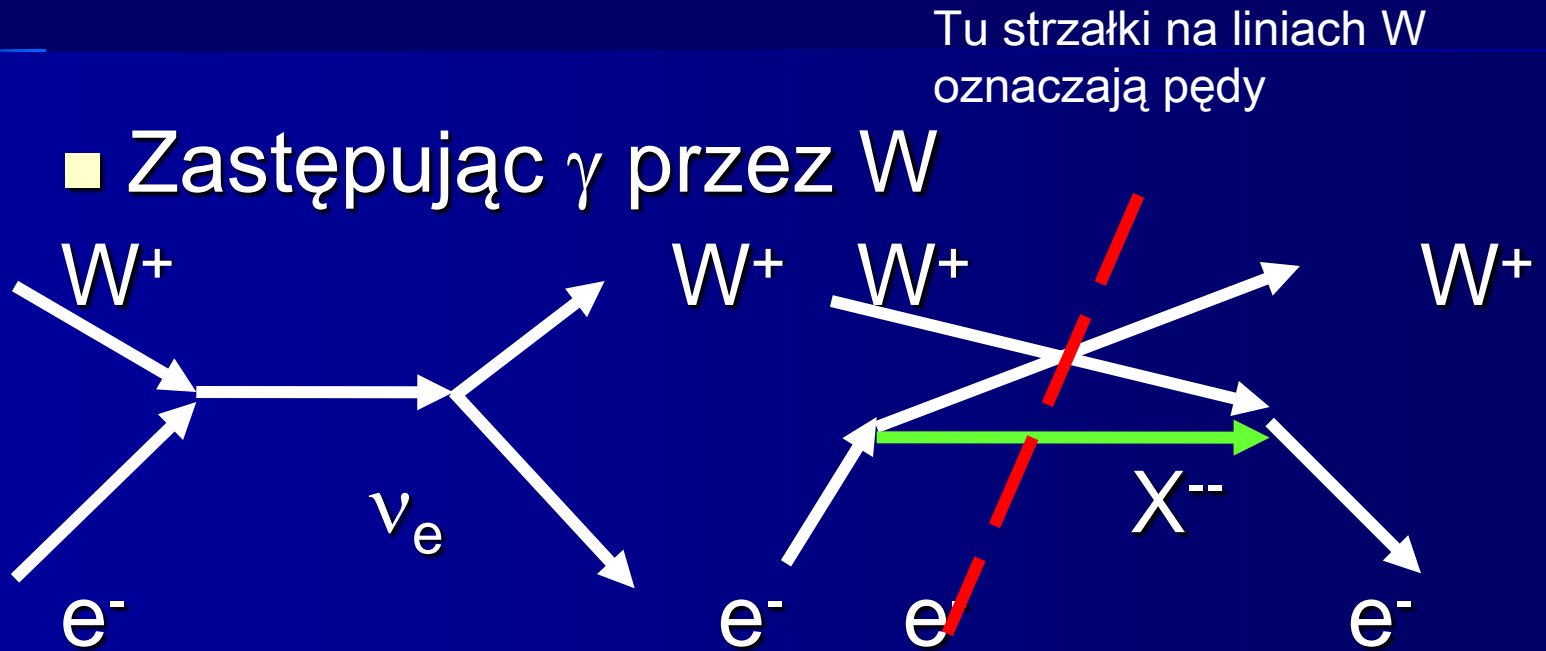
(zaś prawdopodobieństwo  $E^4$ )

„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



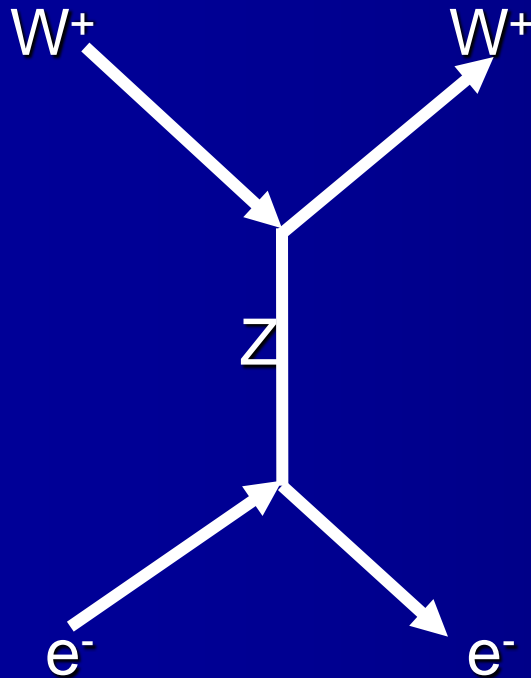
Zachowanie ładunku  $X^{--}$  podwójnie naładowana

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

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

# Neutralny bozon Z konieczny!

- Uwzględniając 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 za dobre zachowanie z E: musi istnieć 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 :  $WW \rightarrow WW$



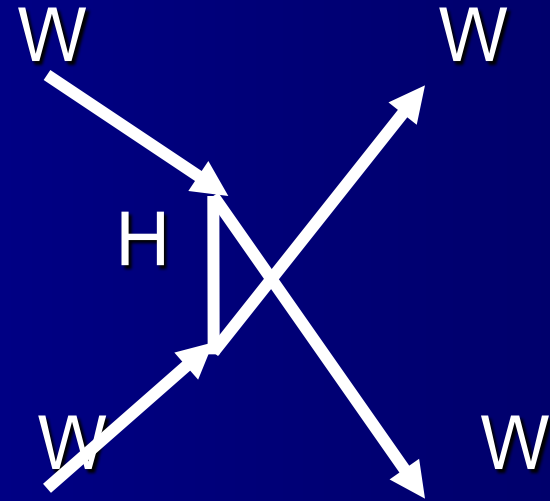
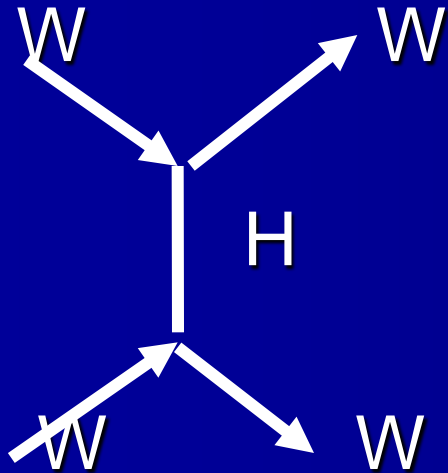


# Człon $E^2$ to w istocie człon $E^2 M^2$ - uwaga: potrzebna cząstka Higgsa!

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

# Rozpraszanie bozonów $W$ na sobie

## - wkład od $H$



Sprzężenia proporcjonalne do mas cząstek do których  $H$  się sprzęga  $\rightarrow$  **wynik końcowy, to dobre zachowanie dla procesu  $WW \rightarrow WW$**

# Koniec? (stan na kwiecień 2015)

- Konieczność istnienia cząstki H, która sprzęga się do każdej cząstki masywnej proporcjonalnie do masy tej cząstki
- Znaleziono w 2012 r
- Masa ok. 125 GeV
- Teoria oddziaływań EW – OK  
tylko cząstka Higgsa była potrzebna  
i zamykamy teorię (Model Standardowy)



## Zamykamy?

# Generacja masy i konsystentny opis procesów dla dużych energii

- Zachowanie dla dużych energii - konieczne aby  $H$  sprzęgała się do masy cząstek  $W/Z$
  - cząstka Higgsa jest związana z generacją mas cząstek poprzez spontaniczne łamanie symetrii
- przewidywania dotyczące cząstki  $H$  związanej z generacją mas identyczne jak z tej analizy prawdopodobieństw dla rozpraszania
- $$WW \rightarrow WW$$
- oczekiwany związek z grawitacją (bo masy) (i strukturą Wszechświata)

# The theory ends here - Veltman

*Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics, 2003*

- 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  $\gamma\gamma$ ,  $e\gamma$ )

**Listopad 2012 :**

**w LHC cząstka H z masą 125 GeV**

*(więcej na następnym wykładzie)*

## Pytania do wykładu

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?

Czy elektrodynamika kwantowa prowadzi do nieskończonych wyrażeń na etapach pośrednich?

Porównaj wartość poprawki jedno- i dwupętlowej QED dla anomального momentu magnetycznego mionu

Z jaką dokładnością znamy (r. 2013) anomalny moment magnetyczny dla mionu (doświadczenie minus przewidywanie teor.)?

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?

Czy odkryto cząstkę Higgsa?