

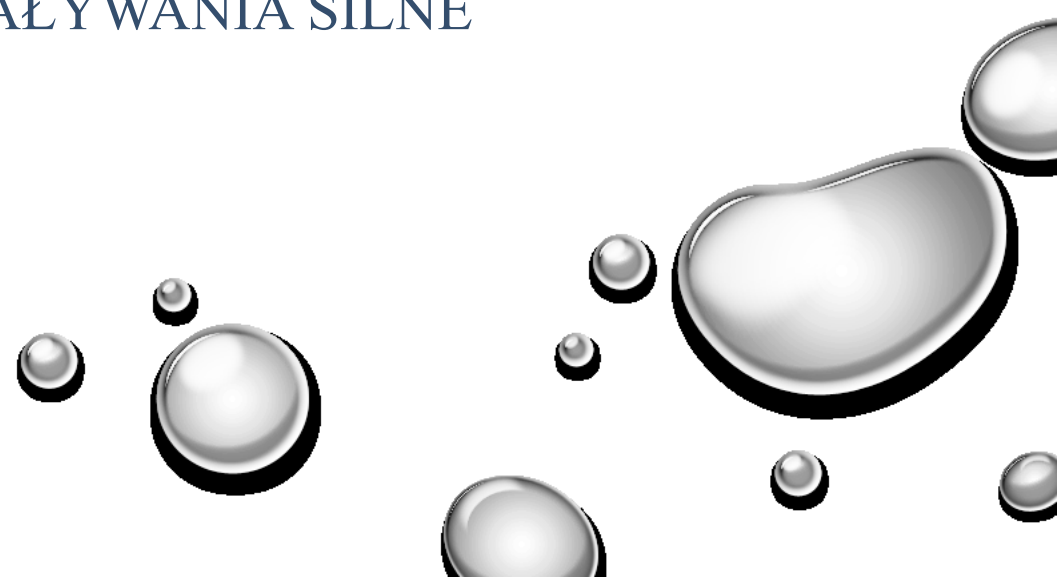


CZĄSTKI ELEMENTARNE I ODDZIAŁYWANIA

X ODDZIAŁYWANIA SŁABE I ELEKTROSŁABE

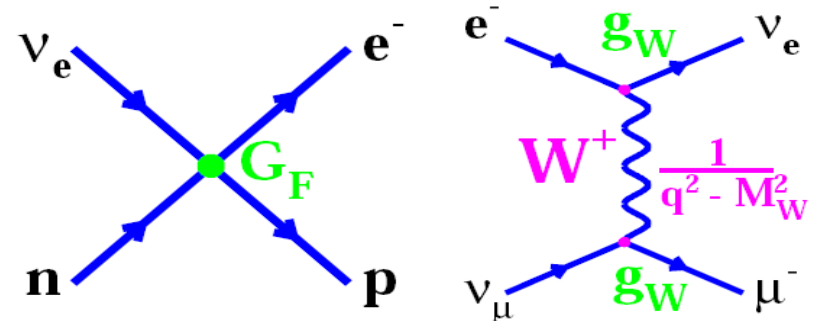
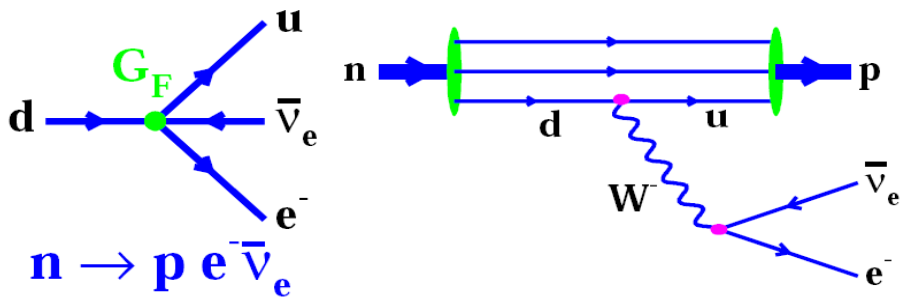
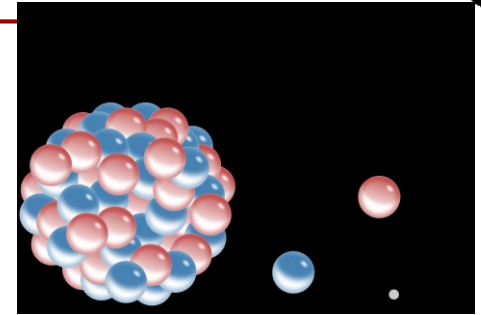
Agnieszka Obłąkowska-Mucha

<http://home.agh.edu.pl/~amucha/>
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek
D11 p. 106

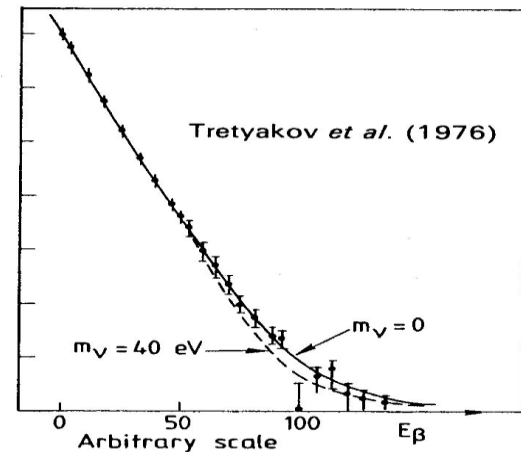


Oddziaływania słabe

- Rozpady β zachodzą poprzez oddziaływania słabe:
 - neutron zmienia się w proton i emituje elektron i neutrino
- 1930 – W.Pauli zaproponował hipotezę neutrino (odkryte w 1956)
- Obecnie rozpady β uważane są jako zmianę kwarków $u \leftrightarrow d$ spowodowaną emisją bozonu W^\pm :



- Oddziaływania słabe są INNE niż elektromagnetyczne i silne:
 - są przenoszone przez ciężkie bozony
 - **zmieniają rodzaj cząstki (leptonów i kwarków)**
- WSZYSTKIE cząstki (również neutrino) oddziałują słabo



Trzy oddziaływania - różne czy podobne?

■ Oddziaływania elektromagnetyczne:

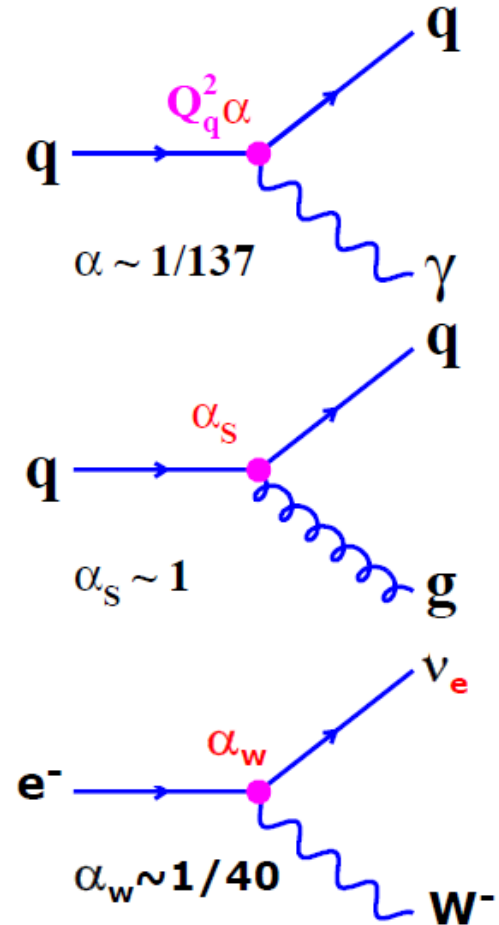
- ✓ pomiędzy kwarkami i naładowanymi leptonami
- ✓ przenoszone przez bezmasowy foton
- ✓ foton oddziałuje z ładunkiem elektrycznym, $\alpha \approx 1/137$
- ✓ nie zmieniają rodzaju cząstek
- ✓ na odległości 10^{-15} m $F_{elm} \approx 200$ N

■ Oddziaływania silne

- ✓ pomiędzy kwarkami i gluonami
- ✓ przenoszone przez bezmasowe gluony
- ✓ gluony oddziałują z ładunkiem kolorowym, $\alpha_s \approx 1$
- ✓ nie zmieniają rodzaju cząstek
- ✓ na odległości 10^{-15} m $F_{strong} \approx 160\ 000$ N

■ Oddziaływania słabe

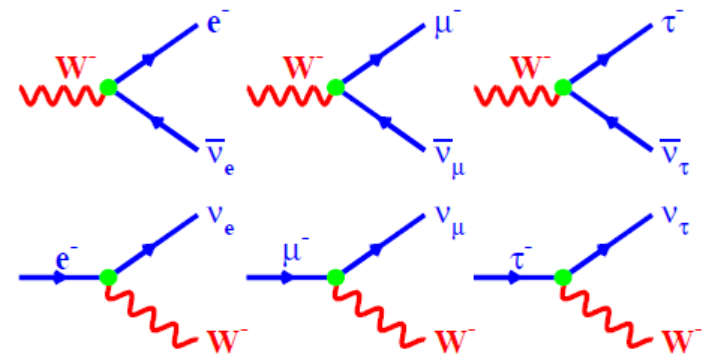
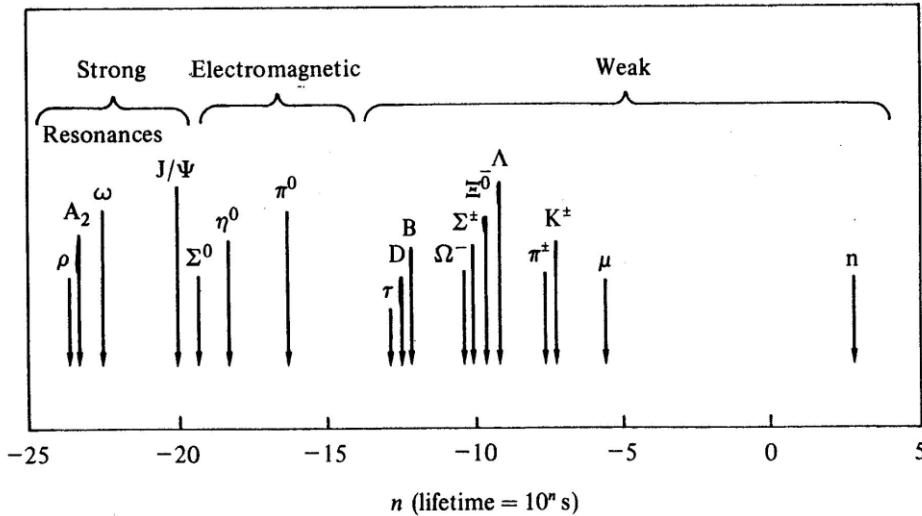
- ✓ pomiędzy kwarkami i wszystkimi leptonami
- ✓ przenoszone przez ciężkie bozony (bo mały zasięg), $\alpha_w \approx 1/40$
- ✓ **zmieniają rodzaj cząstki**
- ✓ na odległości 10^{-15} m $F_{weak} \approx 0.002$ N



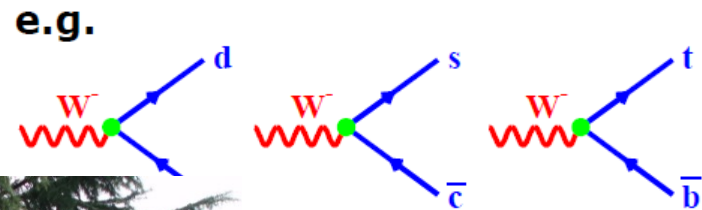
które oddziaływania są podobne?

Gdzie widzimy słabe rozpady?

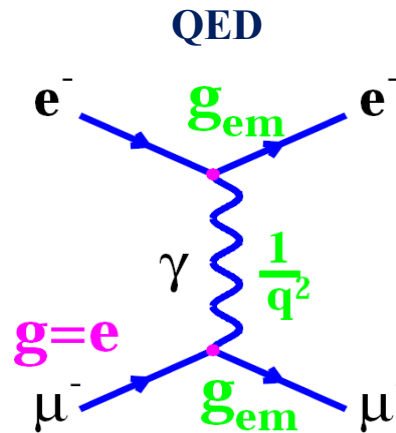
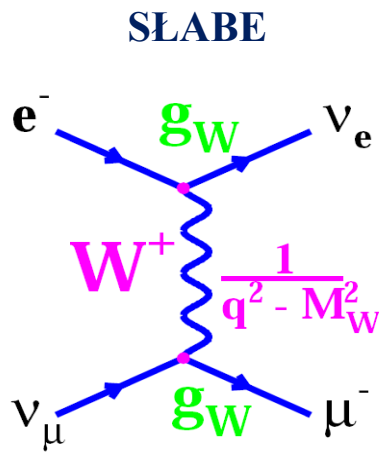
Słabe rozpady są słabe, a więc cząstka żyje stosunkowo długo



rys. M. Thomson



Slabe a elektromagnetyczne

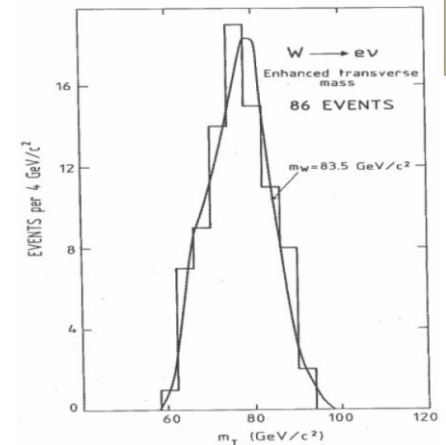


- dla niskich energii, gdy $q^2 \ll M_W^2$ propagator w postaci $\frac{1}{M_W}$ czyli punktowego oddziaływania Fermiego,

- ciężki bozon oznacza krótki zasięg oddziaływania ,

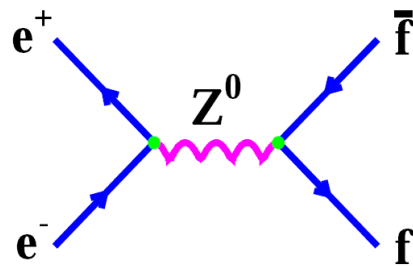
$$M_W = 80.4 \pm 0.1 \text{ GeV}$$

$$Z \approx 0.002 \text{ fm}$$
- wymieniany bozon przenosi ładunek elektromagnetyczny,
- oddziaływanie ZMIENIA ZAPACH KWARKA!
- oddziaływanie łamie parzystości



Słabe a elektromagnetyczne

- Przy niskich energiach (małych przekazach pędu) oddziaływania słabe i elektromagnetyczne różnią się wyraźnie (zasięg, czas życia),
- Przy wyższych energiach (rozpraszanie neutrin) opis Fermiego oddz. słabych daje złe przewidywania.
- pojawia się idea **UNIFIKACJI ODDZIAŁYWAŃ SŁABYCH I ELEKTROMAGNETYCZNYCH**
(Glashow, Salam, Weinberg 1961-67, nagroda Nobla 1979).
- Idea unifikacji polega na opisanu teorii tym samym lagranżianem i tymi samymi bozonami pośredniczącymi.
- Przesłaniem nowej teorii były **FAKTY DOŚWIADCZALNE.**



$$\alpha_s \approx 0.2$$

$$\alpha_W \approx 0.03$$

$$\alpha_{elm} \approx 0.01$$

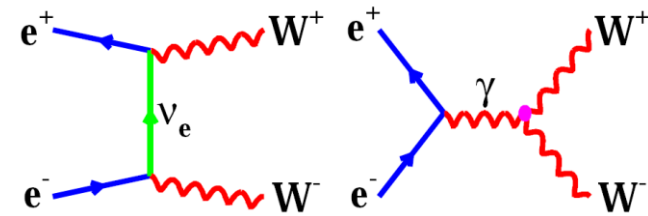
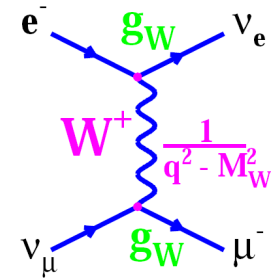
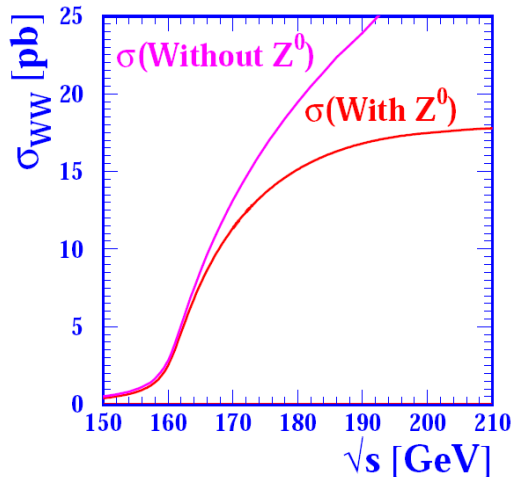
Po co aż trzy bozony?

Przy rozpraszaniu neutrino-elektron wg. teorii Fermiego, przekrój czynny zmierza do nieskończoności.

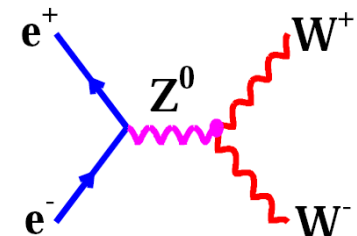
- jeśli oddziaływanie zachodzi z wymianą ciężkiego bozonu – propagator powoduje zmniejszenie szybko rosnących równań,
Przy rozpraszaniu $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ przekrój czynny również miał zbyt szybki wzrost

Oddziaływanie zachodzi poprzez wymianę bozonów pośredniczących – fotonu, W^+ , W^- i Z^0 , które są ze sobą związane.

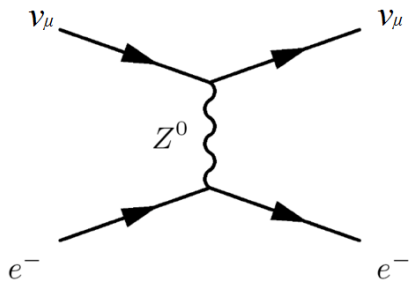
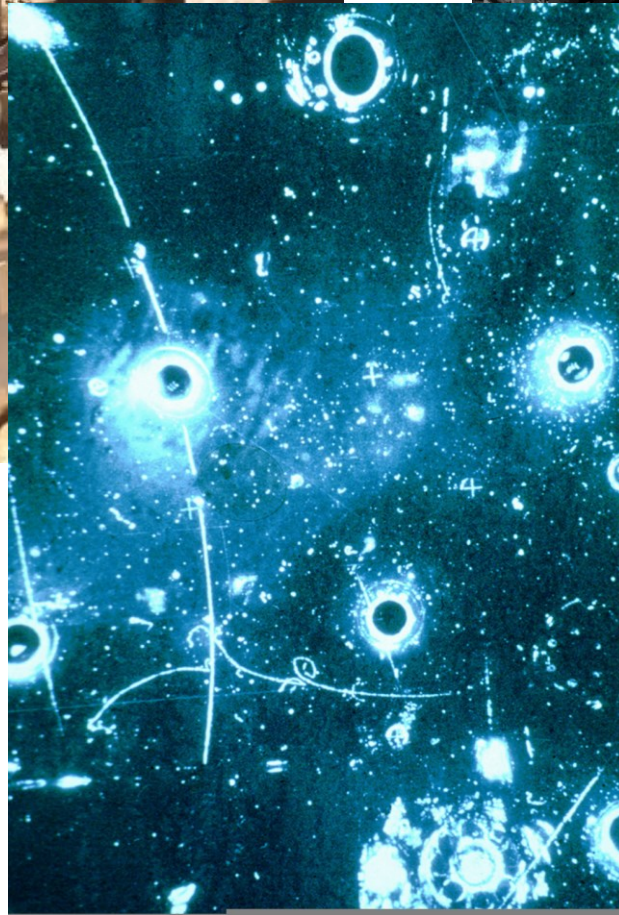
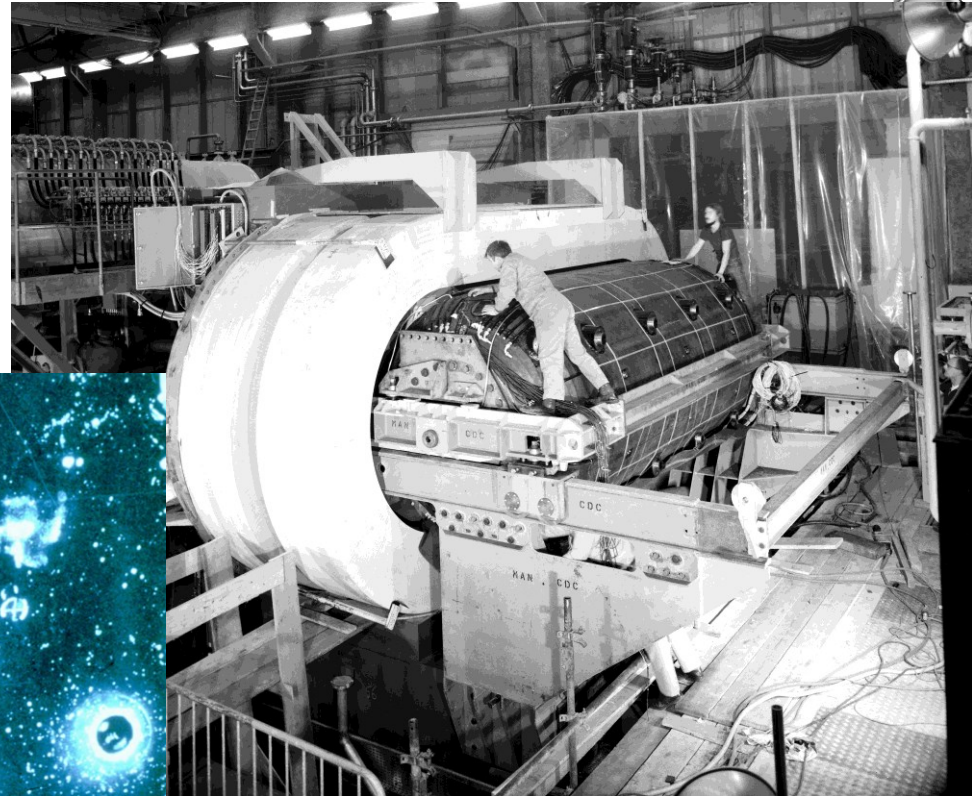
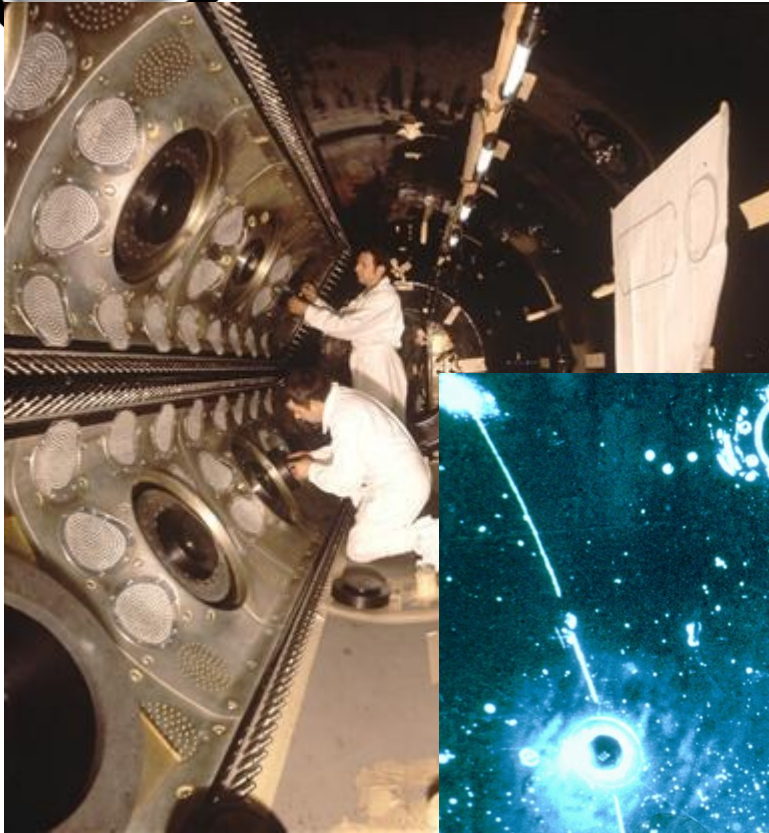
Jedynie taka teoria opisuje wyniki doświadczalne i przewiduje nowe efekty.



interferencja dwóch diagramów

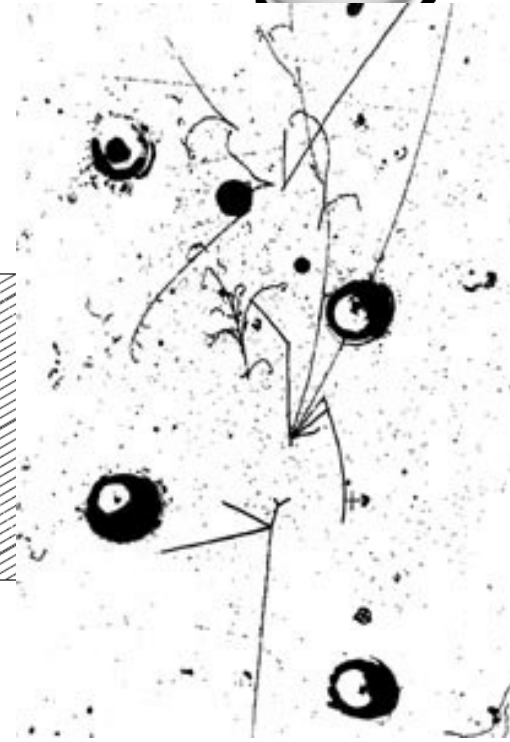
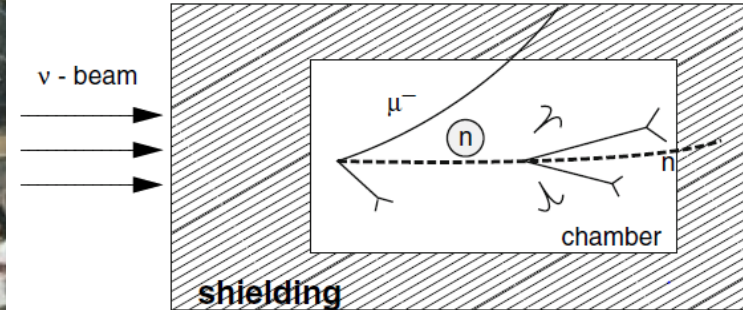


Gargamelle bubble chamber, CERN PS 1971-77

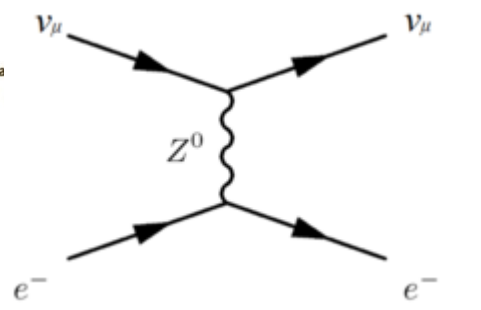
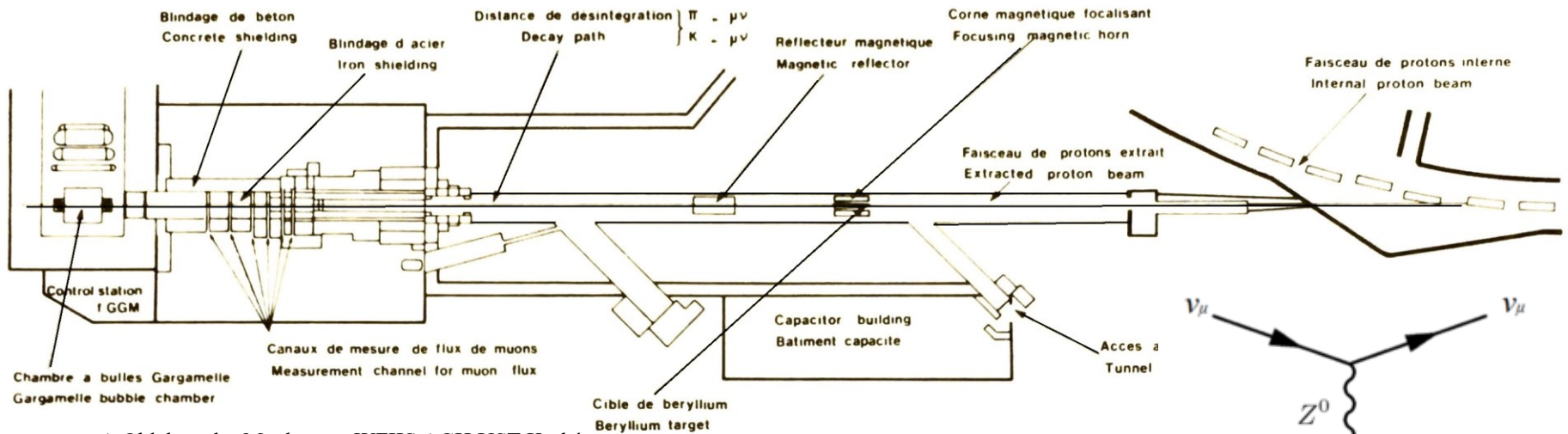


a leptonic neutral current interaction. A neutrino interacts with an electron, the track of which is seen horizontally, and emerges as a neutrino without producing a muon. [Wikipedia]

1973



FAISCEAU NEUTRINO PS
PS NEUTRINO BEAM



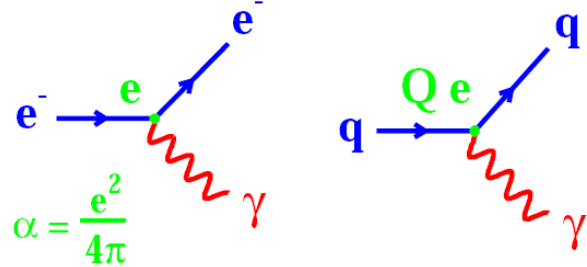
A.Obłąkowska-Mucha WFIIS AGH UST Kraków

Fig. 1-2. The CERN neutrino beam lay-out.

Procesy z Modelu Standardowego

W ramach MS opisujemy elementarne fermiony ich oddziaływania:

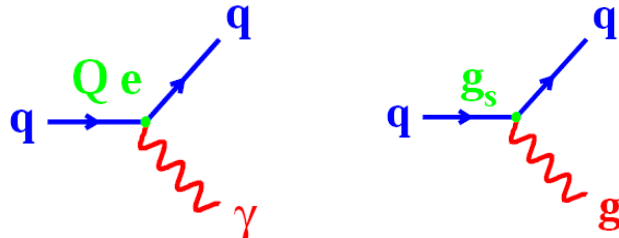
ELEKTROMAGNETYCZNE



$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$$

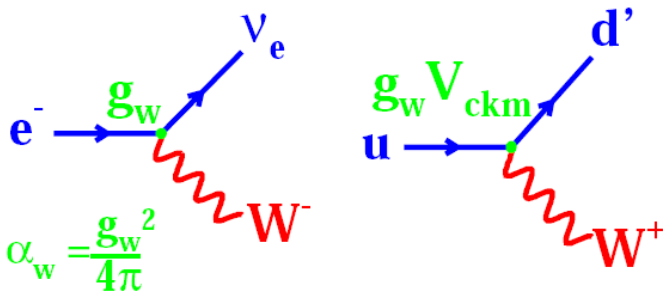
ładunek elektryczny

SILNE



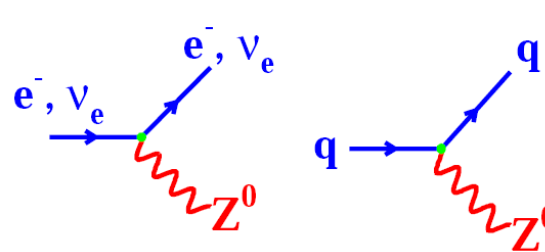
ładunek silny

SŁABE CC (charge current)



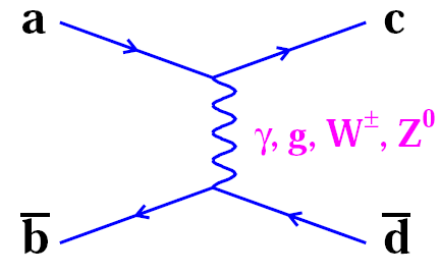
$$\alpha_w = \frac{g_w^2}{4\pi}$$

SŁABE NC (neutral current)

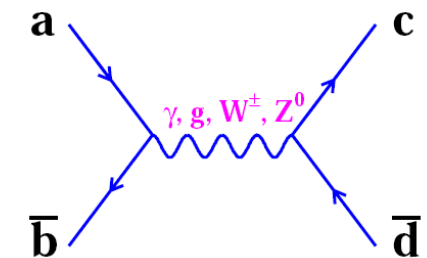


zmieniają rodzaj kwarków pomiędzy generacjami !

rozpraszanie



anihilacja



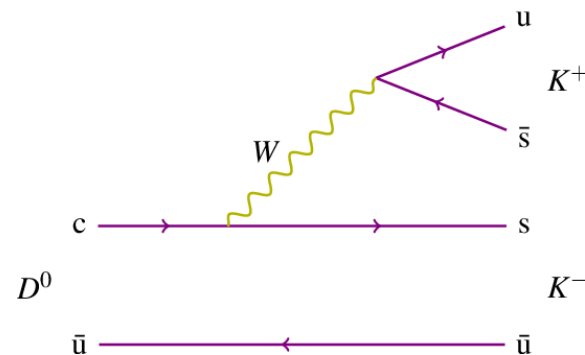
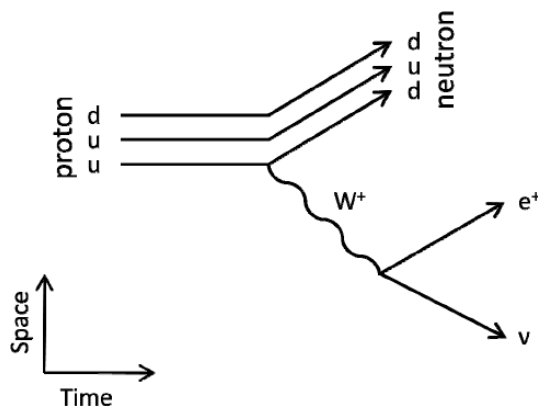
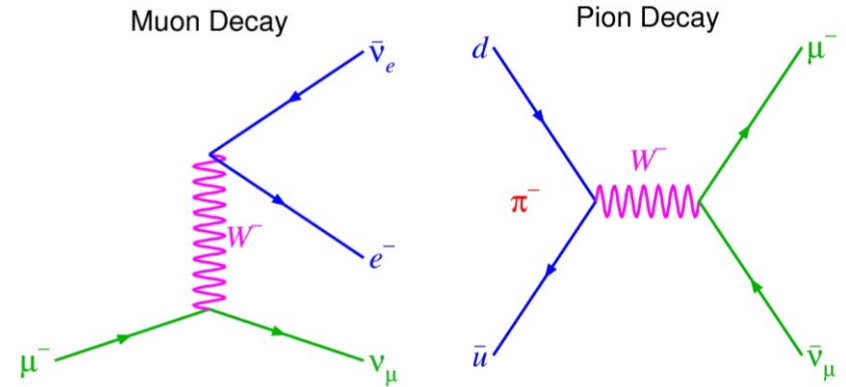
Oddziaływania słabe - klasyfikacja

Procesy słabe można również podzielić ze względu na rodzaj oddziałujących cząstek:

- leptonowe: $\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$

- półleptonowe: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$
 $p \rightarrow n e^+ \nu_e$
 $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$

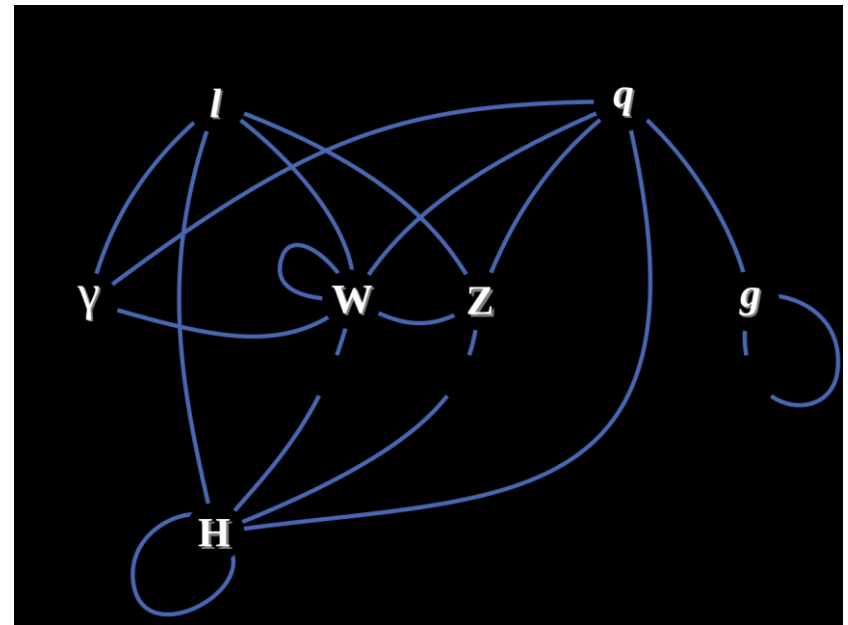
- nieleptonowe: $\Lambda \rightarrow p \pi^-$
 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$
 $B^0 \rightarrow K^- \pi^+$



Model Standardowy

Fermiony			Bozony			
Kwarki	$2.3 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u górny	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c powabny	$173.5 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t szczytowy	Bozony cechowania	0 0 1 γ foton	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z^0 bozon Z
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d dolny	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s dziwny	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b spodni		0 0 1 g gluon	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W^\pm bozon W
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elektron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ mion	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ taon		$?126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H^0 bozon Higgsa	
Leptony	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elektronowe	$<170 \text{ keV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino mionowe	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino taonowe			
	I	II	III			

Masa
Ładunek
Spin

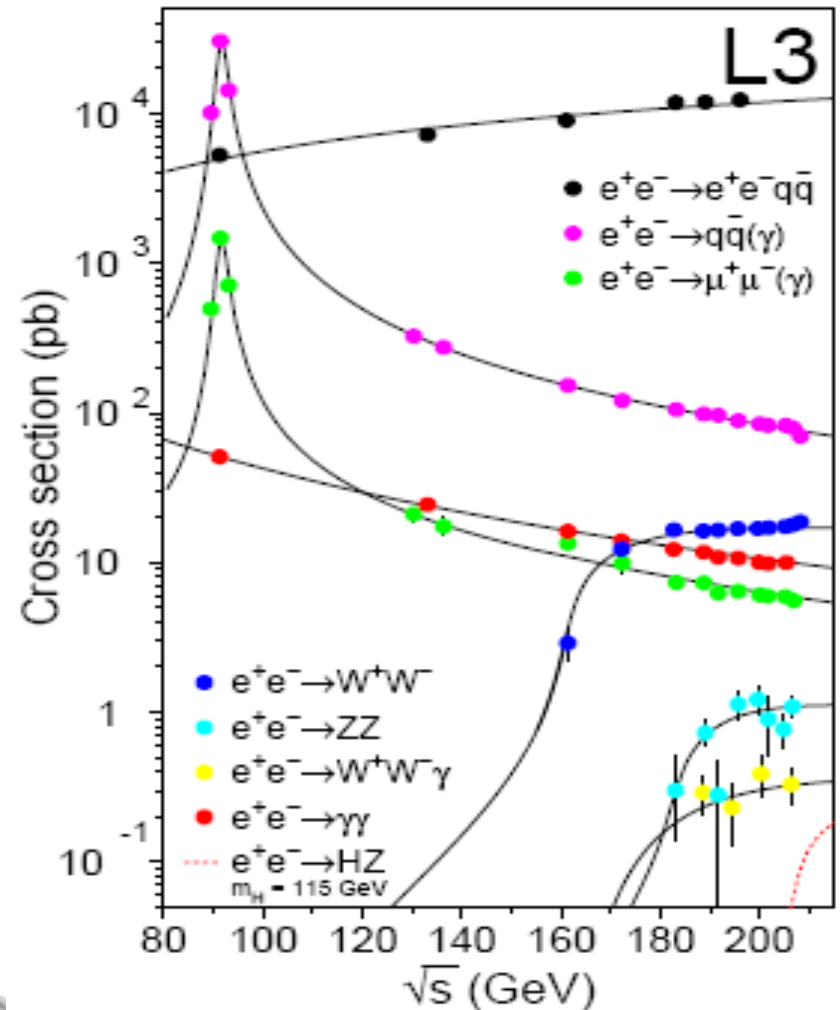
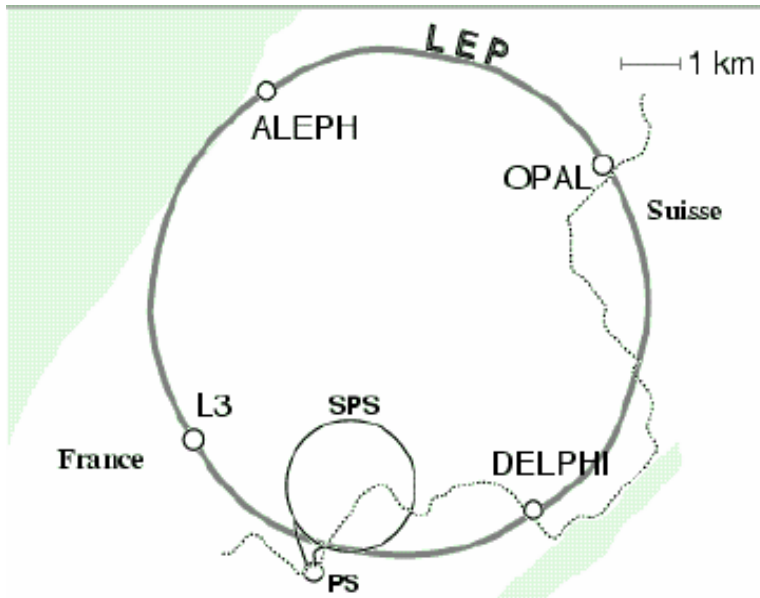


https://pl.wikipedia.org/wiki/Model_standardowy

Fizyka elektrostała na LEP

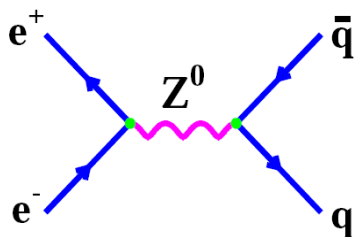
zderzenia elektron-pozyton na LEPie (1975 - 1989 - 2000)

- program fizyczny:
- testy MS w obszarze produkcji bozonu Z^0 ;
- produkcja bozonów W^+W^- ;

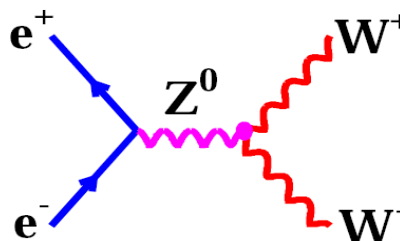


Fizyka na LEPie

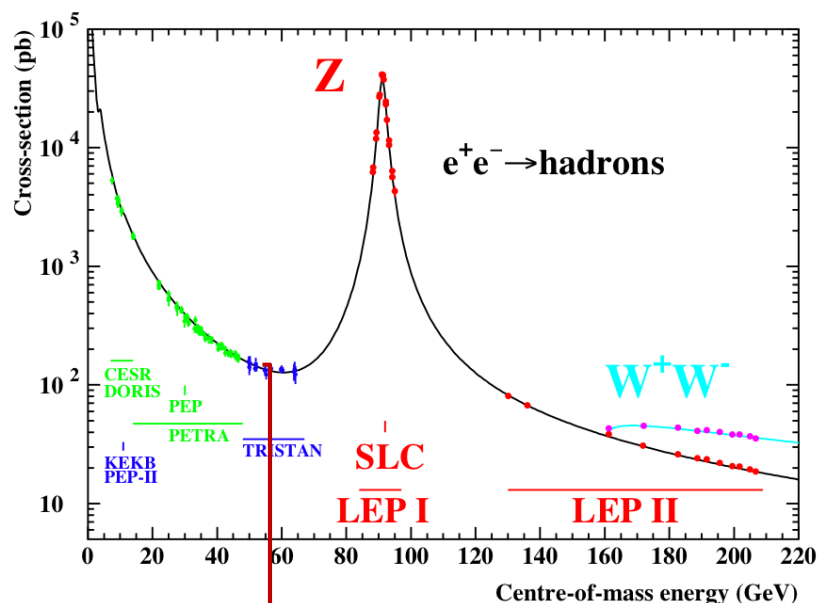
Podstawowe diagramy



niskie energie (LEP I)



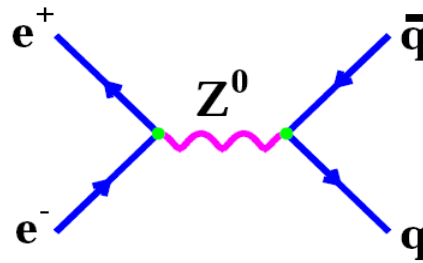
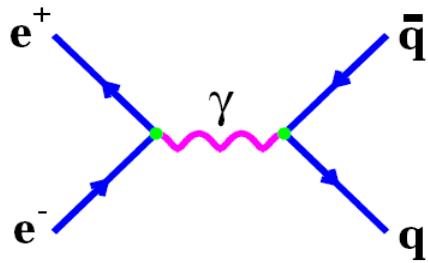
wysokie energie (LEP II)



- Najwyższe osiągnięte energie w akc. $e^+ e^-$, $\sqrt{s} = 90\text{-}200$ GeV
- W czterech eksperymentach zebrano 16 000 000 Z^0 i 30 000 par W^+W^- .
- Bardzo precyzyjne pomiary własności tych bozonów i parametrów Modelu Standardowego,

Do energii $\sqrt{s} = 50$ GeV cząstką pośredniczącą był tylko foton

LEP I (88-94 GeV)

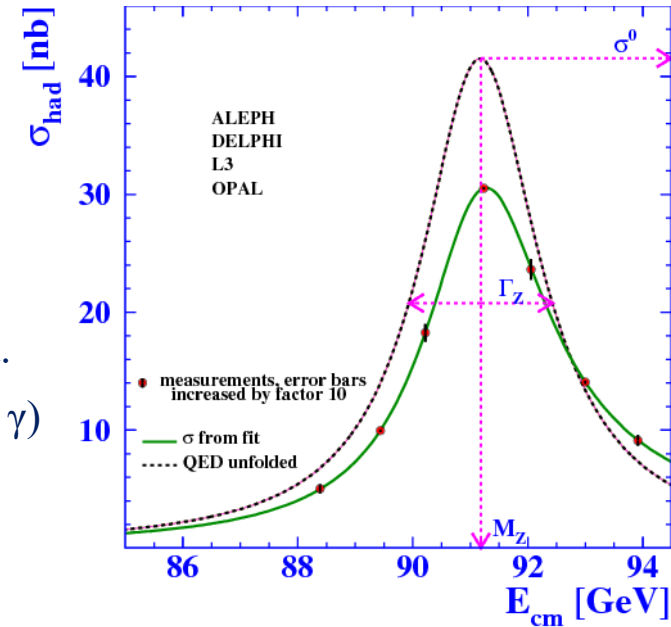


- Przy niższych energiach – $\sqrt{s} < 50$ GeV – tylko wymiana fotonu.
- Przy wyższych energiach – wymiana Z^0 oraz interferencja (Z^0, γ)
- Z^0 rozpada się z czasem 10^{-25} s – rezonans Breita -Wignera.

Przebieg eksperymentu:

- elektrony przyspieszane do energii w pobliżu masy Z^0 ,
- pomiar przekroju czynnego $\sigma(e^+e^- \rightarrow f\bar{f}, q\bar{q})$
- wyznaczanie parametrów:

masy Z^0 ,
całkowitej szerokości Γ_Z
przekroju czynnego dla piknu σ_0



Przy $\sqrt{s} = 90$ GeV (M_Z) – dominacja Z^0

Przekrój czynny e^+e^-

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f\bar{f}) = g \frac{\pi}{E_e^2} \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{f\bar{f}}}{(E_{CM} - M_Z)^2 + \frac{\Gamma_Z^2}{4}} \quad g = \frac{2J_Z + 1}{(2S_{e^+} + 1)(2S_{e^-} + 1)}$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f\bar{f}) = \frac{3\pi}{4E_e^2} \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{f\bar{f}}}{(\sqrt{s} - M_Z)^2 + \frac{\Gamma_Z^2}{4}}$$

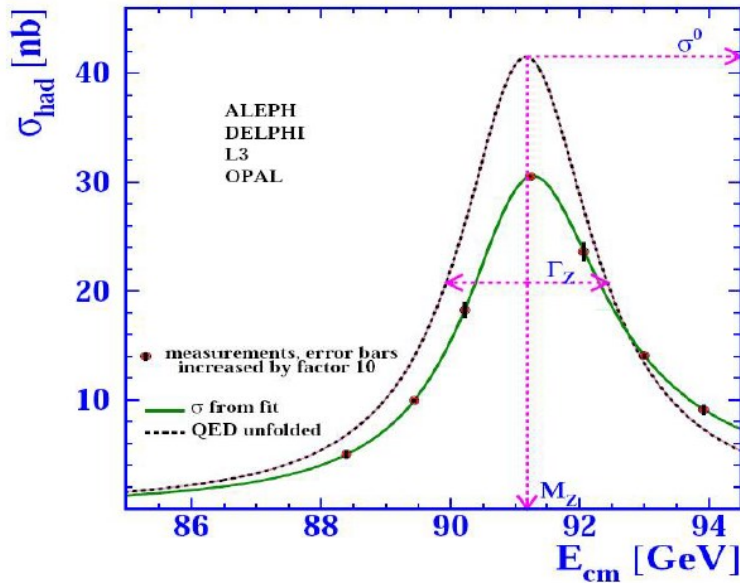
Całkowita szerokość – suma szerokości na poszczególne stany końcowe

$$\Gamma_Z = \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{q\bar{q}} + \Gamma_{\nu\bar{\nu}}$$

W pikie (maksimum): $\sqrt{s} = M_Z$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f\bar{f}) = \frac{12\pi}{M_Z^2} \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{f\bar{f}}}{\Gamma_Z^2}$$

Wyznaczenie kształtu linii Z^0



Najbardziej precyzyjne wyniki HEP:

$$M_Z = 91.1875 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

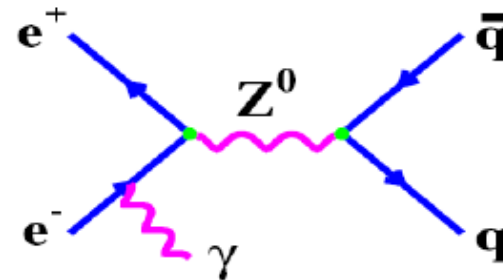
$$\Gamma_Z = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$$

$$\sigma_{\bar{q}q} = 41.540 \pm 0.037 \text{ nb}$$

„poprawki radiacyjne”:

elektron przed zderzeniem może wypromieniować foton – obniża to jego energię.

Krzywą doświadczalną należy przeskalować o poprawki związane z QED.



Liczba pokoleń

- W oparciu o wyznaczenie kształtu linii Z^0 można obliczyć liczbę pokoleń fermionów:

$$\begin{pmatrix} e^- & d \\ \nu_e & u \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu^- & s \\ \nu_\mu & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau^- & b \\ \nu_\tau & t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} ? & ? \\ ? & ? \end{pmatrix}$$

- Skoro Z^0 oddziałuje z wszystkimi fermionami (również neutrinami) tak samo, to wkład od następnego pokolenia (o masie $< M_Z/2$) byłby widoczny w całkowitej szerokości.

$$\Gamma_Z = \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{q\bar{q}} + \Gamma_{\nu\bar{\nu}}$$

$$\Gamma_{\nu\bar{\nu}} = \Gamma_{\nu_e\bar{\nu}_e} + \Gamma_{\nu_\mu\bar{\nu}_\mu} + \Gamma_{\nu_\tau\bar{\nu}_\tau}$$

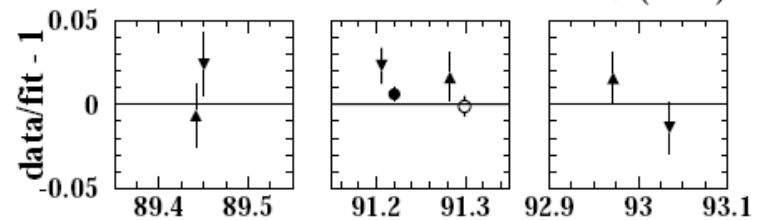
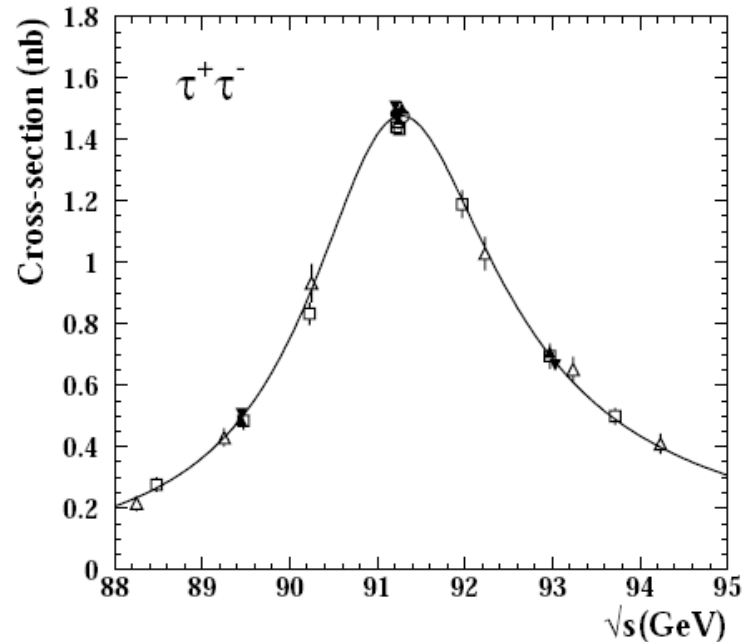
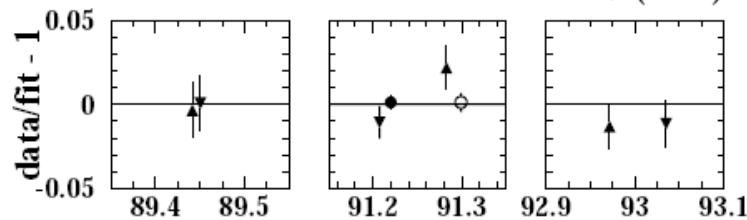
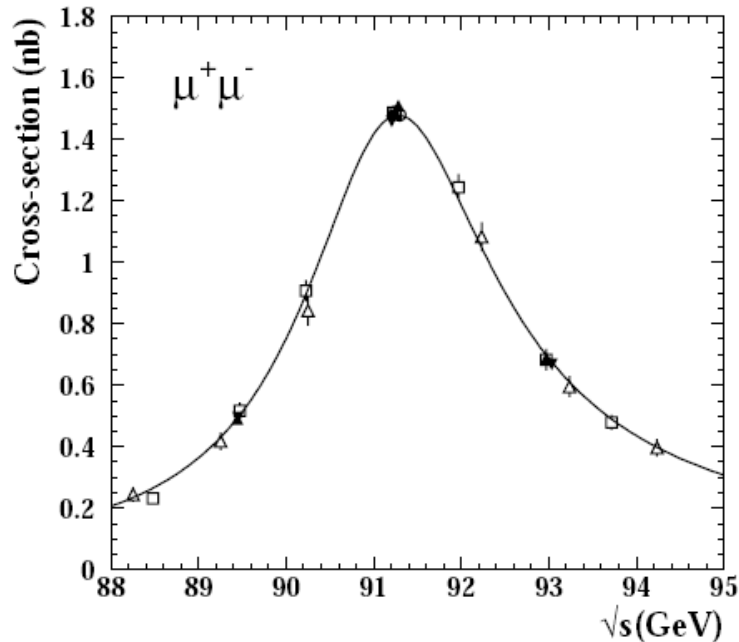
- Następnego pokolenia neutrino nie zaobserwujemy bezpośrednio, ale jego istnienie zwiększy całkowity przekrój czynny i całkowitą szerokość Z^0 . Ale neutrino i tak nie widzimy, więc widzialna część przekroju czynnego ZMNIJSZY SIĘ !
- W maksimum mamy:

$$\sigma_{f\bar{f}}^0 = \frac{12\pi}{M_Z^2} \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{f\bar{f}}}{\Gamma_Z^2}$$

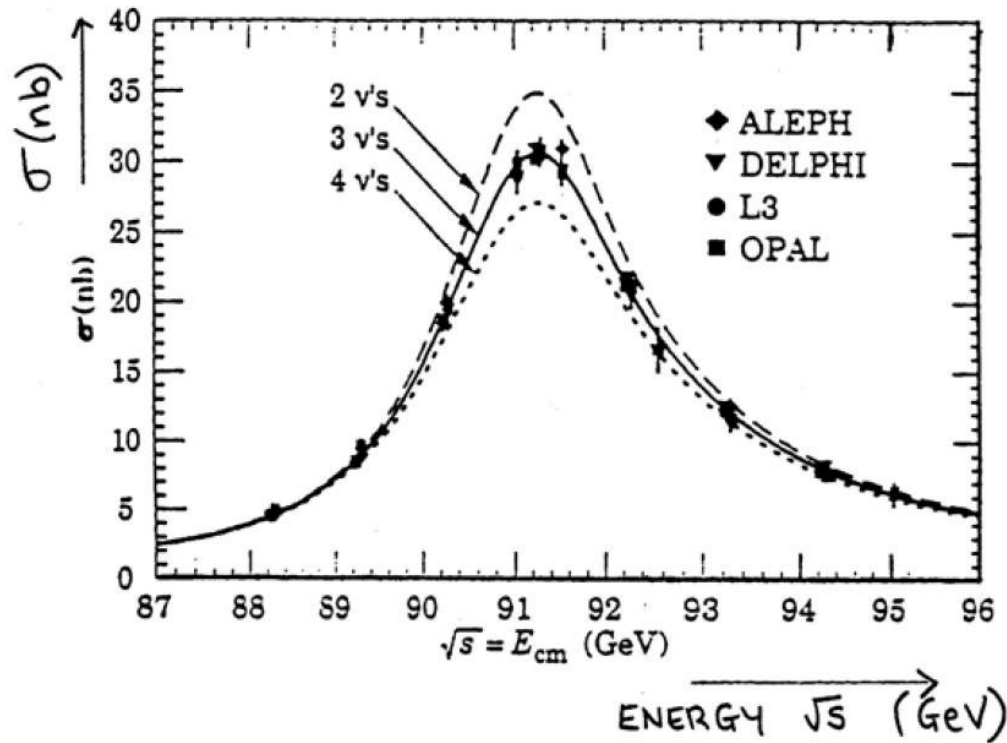
Pomiar liczby neutrin

Mierzmy przekrój czynny dla wszystkich widzialnych stanów końcowych (czyli bez neutrin)-
precyzyja!

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f\bar{f})$$



Pomiar liczby neutrin



W dostępnym zakresie energii istnieją 3 pokolenia neutrin.

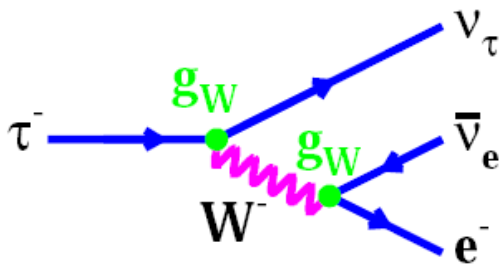
Szerokości cząstkowe dla leptonów potwierdzają uniwersalność leptonów.

Szerokość dla kwarków potwierdza kolor.

Uniwersalność leptonów

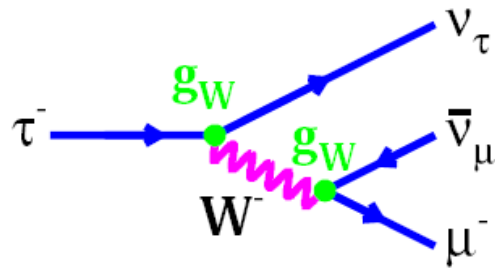
Popatrzmy dalej na rozpady leptonu τ – jest on tak ciężki, że może rozpaść się również na hadrony.

$$\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e$$



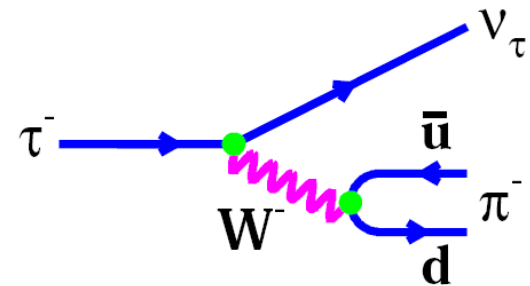
$$17.8 \pm 0.1\%$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu$$



$$17.3 \pm 0.1\%$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau$$



$$10.9 \pm 0.1\%$$

obliczenia czasu życia i stałej sprzężenia dla τ pokazują:

UNIWERSALNOŚĆ LEPTONÓW.

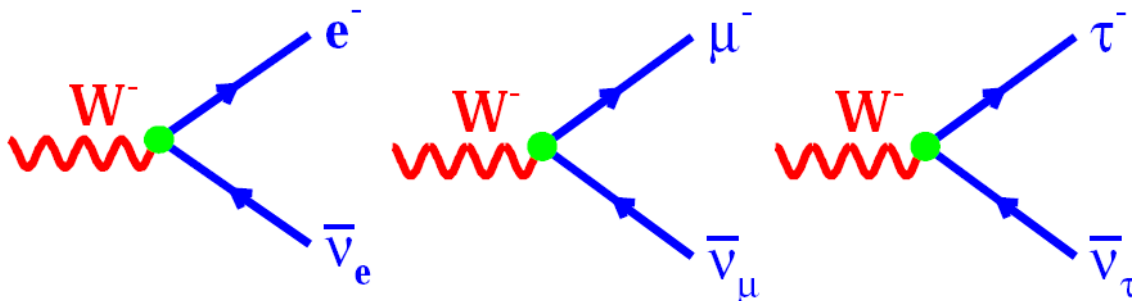
Naładowane prądy w tych rozpadach są TAKIE SAME dla wszystkich leptonów.

$$\tau^- \rightarrow \text{hadrony} \quad 64.7 \pm 0.2\%$$

Słabe rozpady leptonów

- Prądy naładowane (oddz. przenoszone przez bozon W) działają w obrębie dubletów (tego samego pokolenia):

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

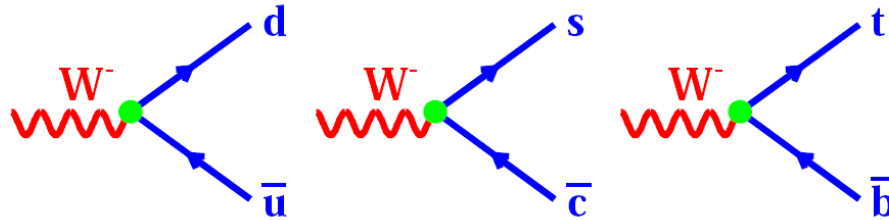


BRAK: $W \rightarrow e^- \nu_\mu$

nie ma oddziaływań pomiędzy leptonami z różnych pokoleń

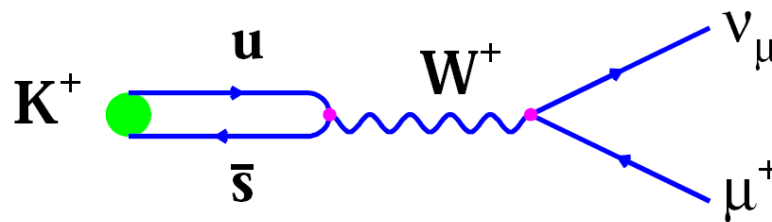
Słabe rozpady kwarków

Podobnie mogłoby być dla kwarków:



gdyby nie obserwacja procesu: $K^+ (u \bar{s}) \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

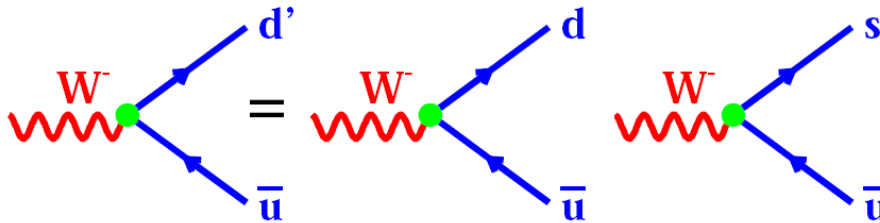
w którym widać wierzchołek $W^+ \rightarrow u \bar{s}$ ze **ZMIANĄ POKOLENIA!**



oznacza to, że słabe rozpady kwarków wyglądają trochę inaczej, bo mogą zachodzić ze zmianą pokolenia

Mieszanie kwarków

- Stany, które biorą udział w słabych oddziaływaniach są ortogonalnymi kombinacjami stanów o określonym zapachu, czyli: oddz. słabe „widzą” zamiast kwarka d – jego stan będący kombinacją d i s:



STANY SŁABE

stany masowe (silne)

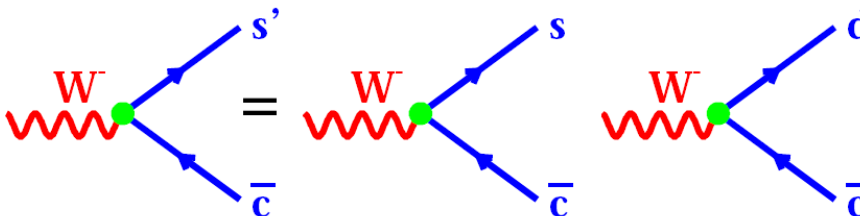
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} d' &= d \cos \theta_c + s \sin \theta_c \\ s' &= s \cos \theta_c - d \sin \theta_c \end{aligned}$$

W oddziaływaniach słabych częściej występują człony z $\cos \theta_c$, człony proporcjonalne do $\sin \theta_c$ są tłumione.

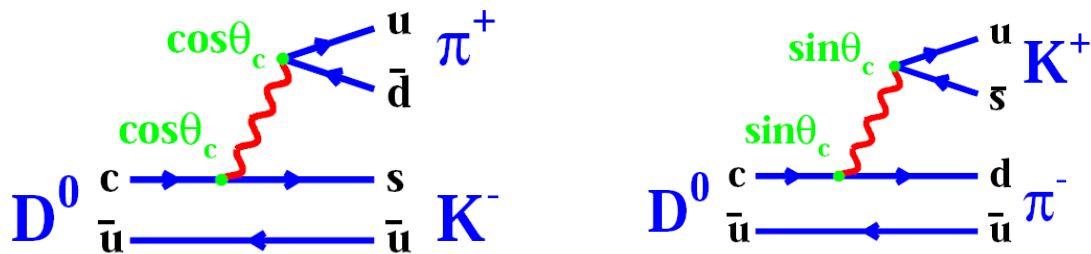
kąt mieszania (kąt Cabbibo)

$$\theta_c = 13^\circ$$



Tłumienie w słabych rozpadach

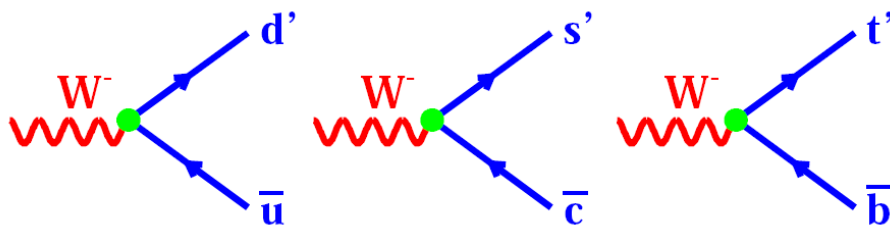
Wprowadzenia kąta mieszania doskonale tłumaczy tłumienie występowania niektórych rozpadów:



$$\frac{\Gamma(D^0 \rightarrow K^+\pi^-)}{\Gamma(D^0 \rightarrow K^-\pi^+)} = \frac{\sin^4 \theta_c}{\cos^4 \theta_c} \approx 0.0028$$

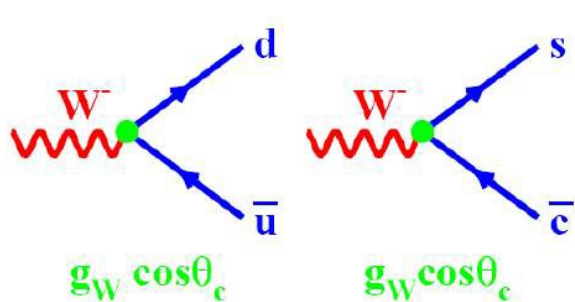
Macierz CKM

Uogólnienie na trzy rodziny kwarków:

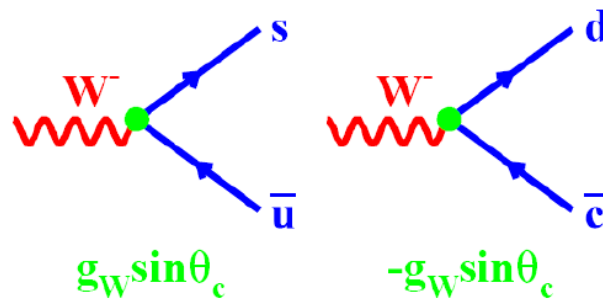


$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

najbardziej częste są przejścia na diagonalach, przejścia ze zmianą dwóch pokoleń-
silnie TŁUMIONE

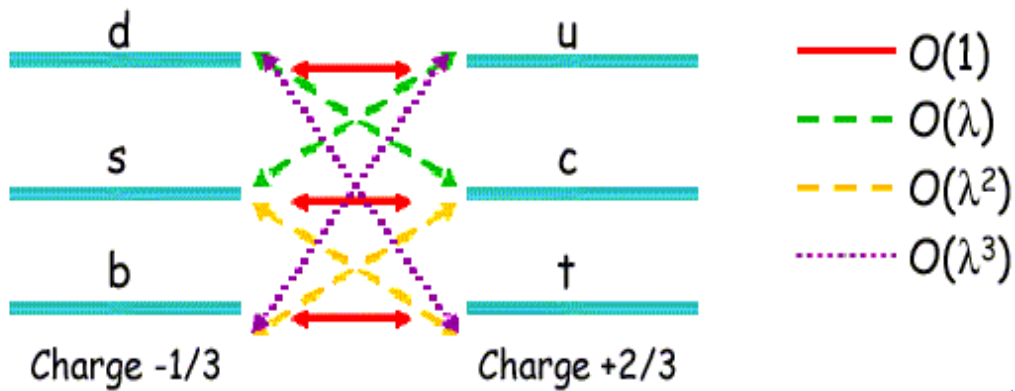
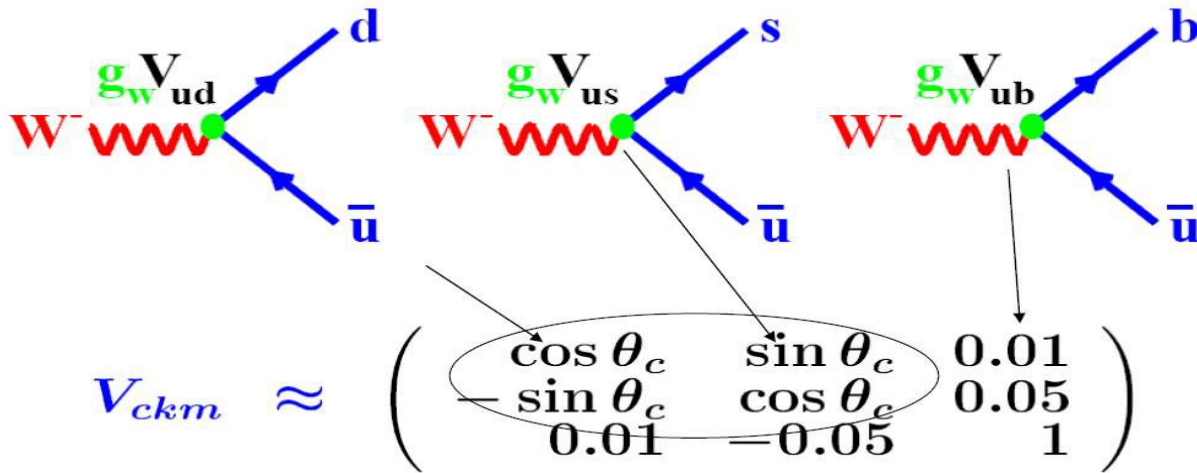


$$|M|^2 \propto \cos^2 \theta_c$$



$$|M|^2 \propto \sin^2 \theta_c$$

Macierz CKM

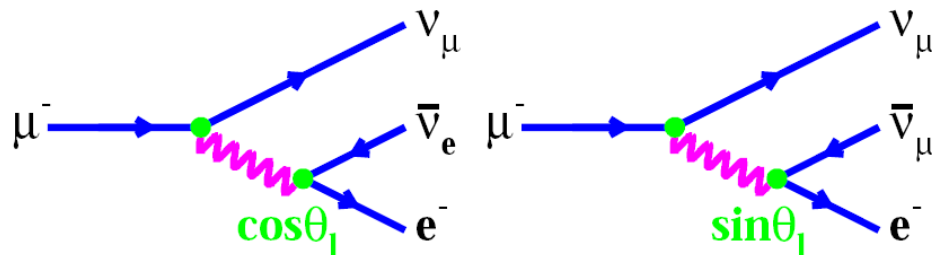


Mieszanie leptonów?

$$V_{ckm} \approx \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0.01 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0.05 \\ 0.01 & -0.05 & 1 \end{pmatrix}$$

Pomiar parametrów macierzy CKM – program fizyczny eksperymentów: BELLE (Japonia), BaBar (USA) i LHCb (CERN).

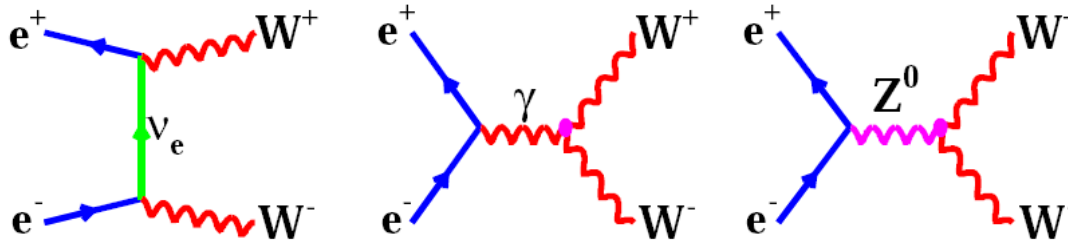
Sukces macierzy mieszania – koncepcja **mieszania leptonów?**



Problem doświadczalny – jak określić rodzaj neutrina?
Kwarki mają różne masy i można rozróżnić stany końcowe.

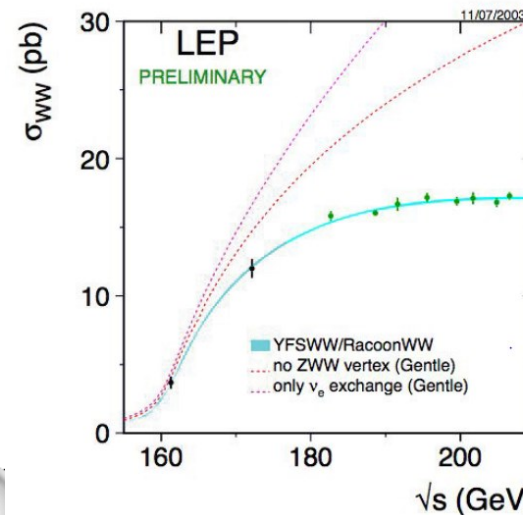
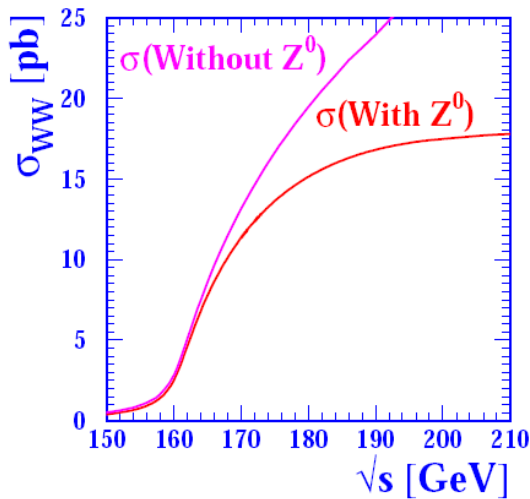
LEP II

W zderzeniach $e^+ e^-$ powstaje para $W^+ W^-$. Proces jest przenoszony przez neutrino, ale skoro bozony W są naładowane, to istnieją również wierzchołki elektromagnetyczne:



Istnienie Potrójnego Wierzchołka było przewidziane...

... i zostało potwierdzone doświadczalnie!



Rozpady W^+W^- w LEP

- W modelu standardowym wierzchołki $W^+ \rightarrow l\nu$ są takie same (zachodzą tak samo często).
- Pamiętając o kolorach mamy do dyspozycji stany końcowe:

			3 TIMES		
e	μ	τ	u	c	t
ν_e	ν_μ	ν_τ	d	s	b

i spodziewamy się ich w stosunkach:

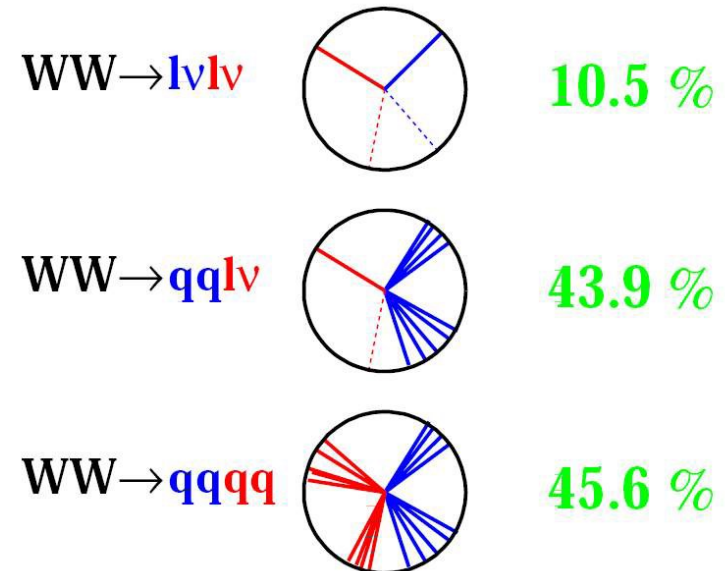
$$\text{Br}(W^\pm \rightarrow q\bar{q}) = \frac{2}{3}$$

$$\text{Br}(W^\pm \rightarrow l\nu) = \frac{1}{3}$$

a po uwzględnieniu „kolorowych” poprawek z QCD:

$$\text{Br}(W^\pm \rightarrow q\bar{q}) = 0.675$$

A mamy z doświadczenia:



Zad: zweryfikować uniwersalność leptonów i kwarków na podstawie powyższych wyników.

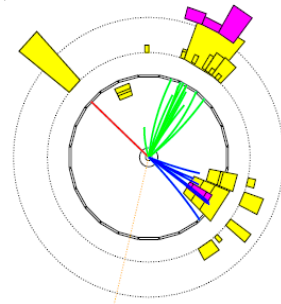
Masa i szerokość W^\pm

W przeciwieństwie do rezonansowej produkcji Z^0 , masę W^\pm wyznacza się licząc masę niezmienniczą produktów rozpadu.

- Musimy mieć pędy wszystkich cząstek i ich identyfikację.

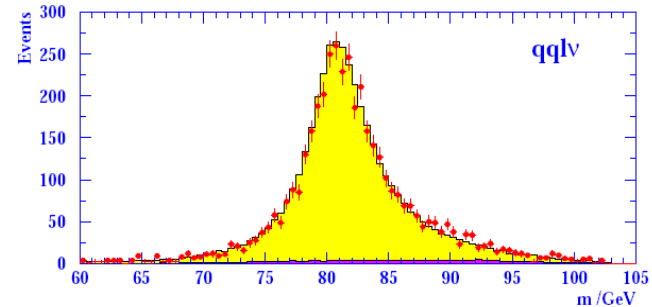
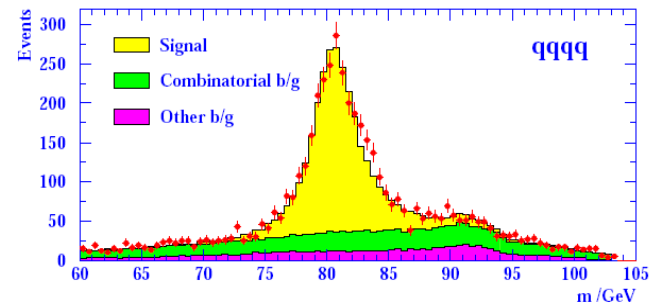
$$M_W = 80.423 \pm 0.038 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_W = 2.12 \pm 0.11 \text{ GeV}$$



$$\begin{aligned} &\rightarrow \vec{p}_{q_1}, \vec{p}_{q_2}, \vec{p}_e, \vec{p}_\nu \\ &\rightarrow M_W = \frac{1}{2}(M_{q\bar{q}} + M_{ln}) \end{aligned}$$

OPAL 183-209 GeV $\int L dt = 677 \text{ pb}^{-1}$



Fizyka modelu elektroslabego

- Pomiary na LEPie są najdokładniejszymi testami Modelu Standardowego.

$$\alpha_{em}$$

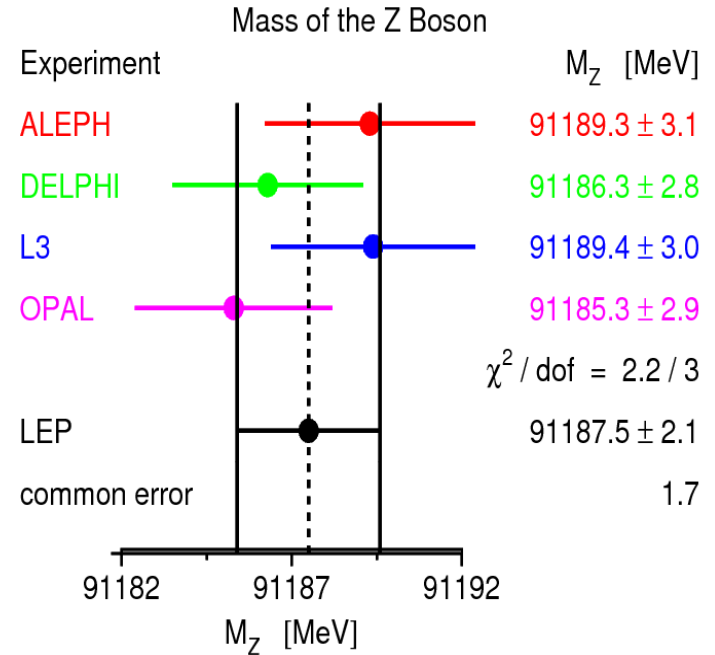
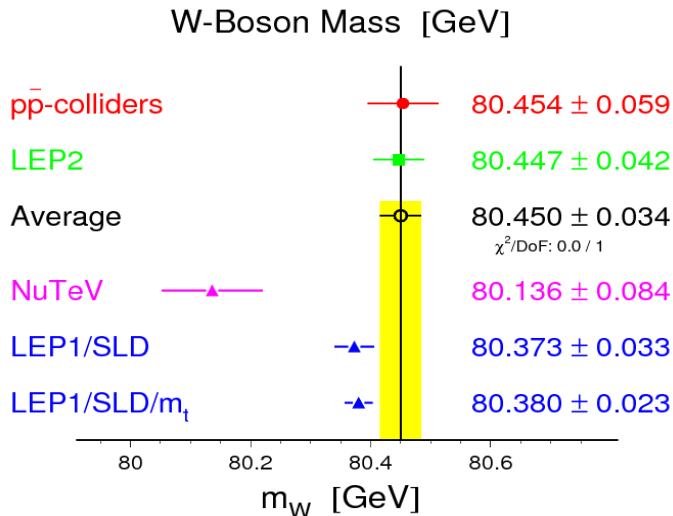
$$G_F = (1.16632 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$M_W = (80.423 \pm 0.038) \text{ GeV}$$

$$M_{Z^0} = (91.1875 \pm 0.0021) \text{ GeV}$$

$$\sin^2 \theta_W = 0.23143 \pm 0.00015$$

- Wyznaczono większość parametrów MS.



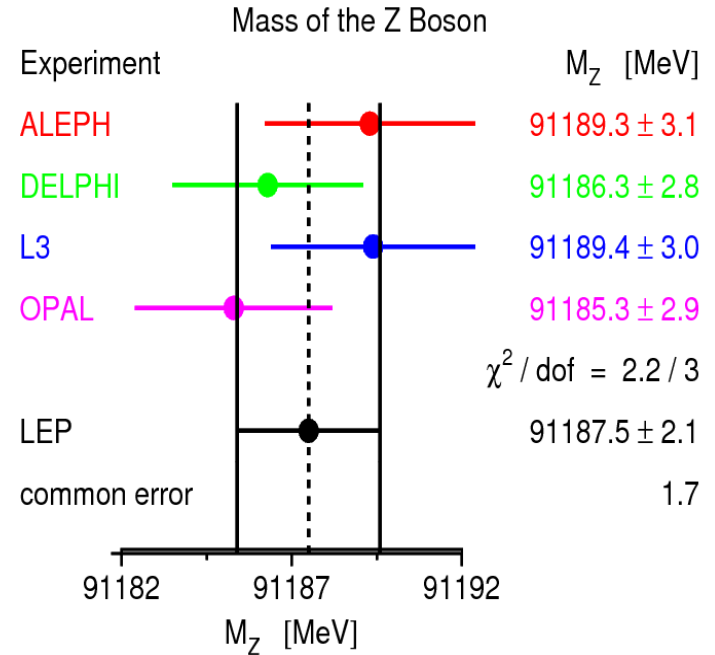
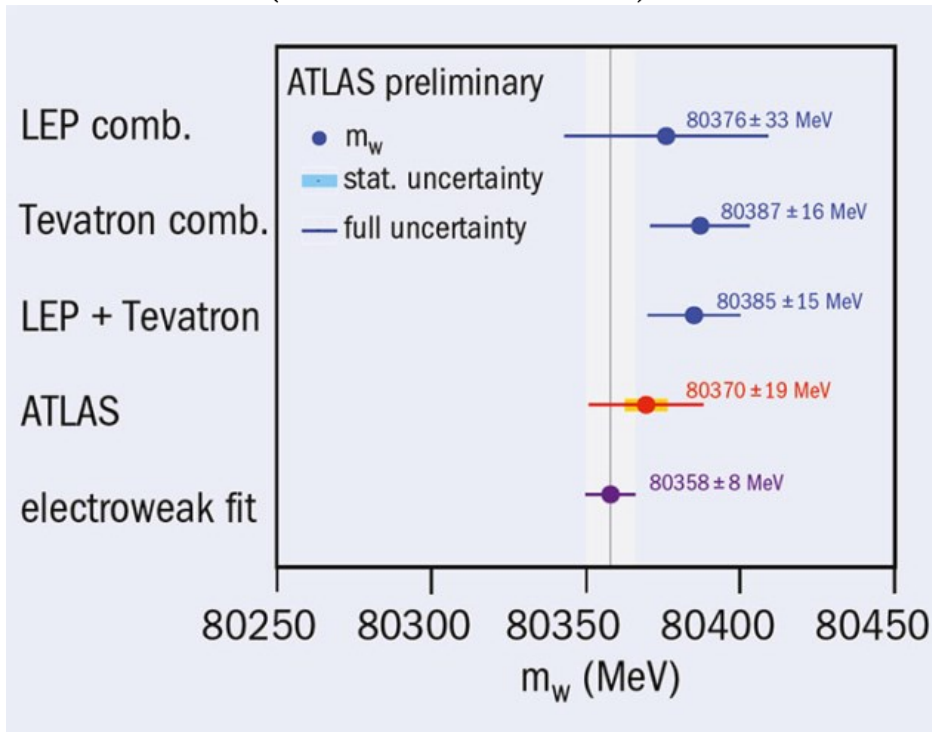
Fizyka modelu elektroslabego

Pomiary na LEPie są najdokładniejszymi testami Modelu Standardowego.

$$\alpha_{em}$$

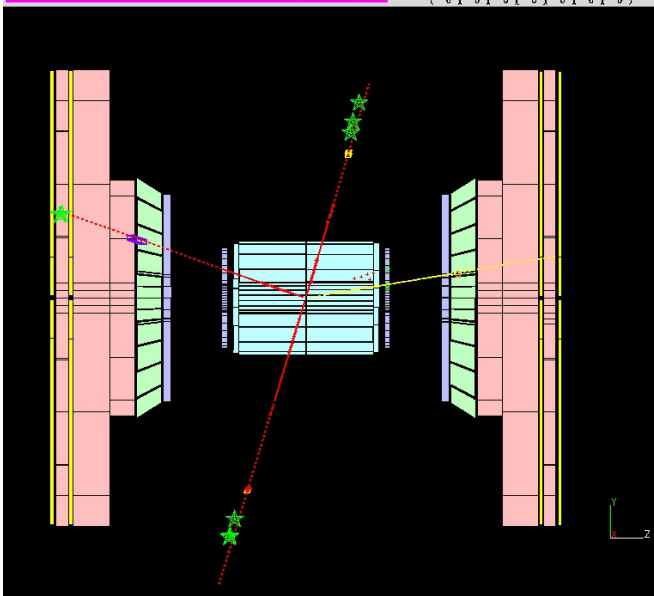
$$G_F = (1.16632 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$M_W = (80.423 \pm 0.038) \text{ GeV}$$

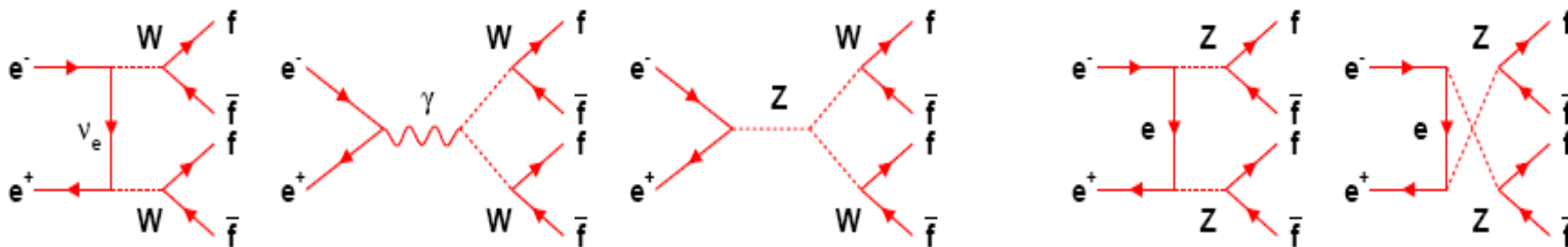
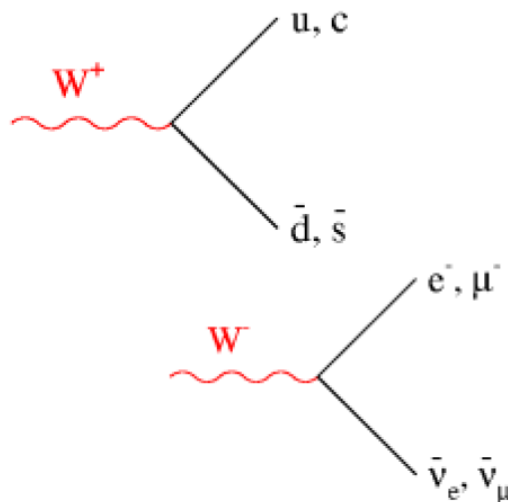


Obserwacja przypadków W^+W^-

DELPHI Run: 104731 Evt: 13458
 Beam: 100.1 GeV Proc: 6-Aug-1999
 DAS: 6-Aug-1999 Scan: 26-Aug-1999
 06:52:38 Tan+DST

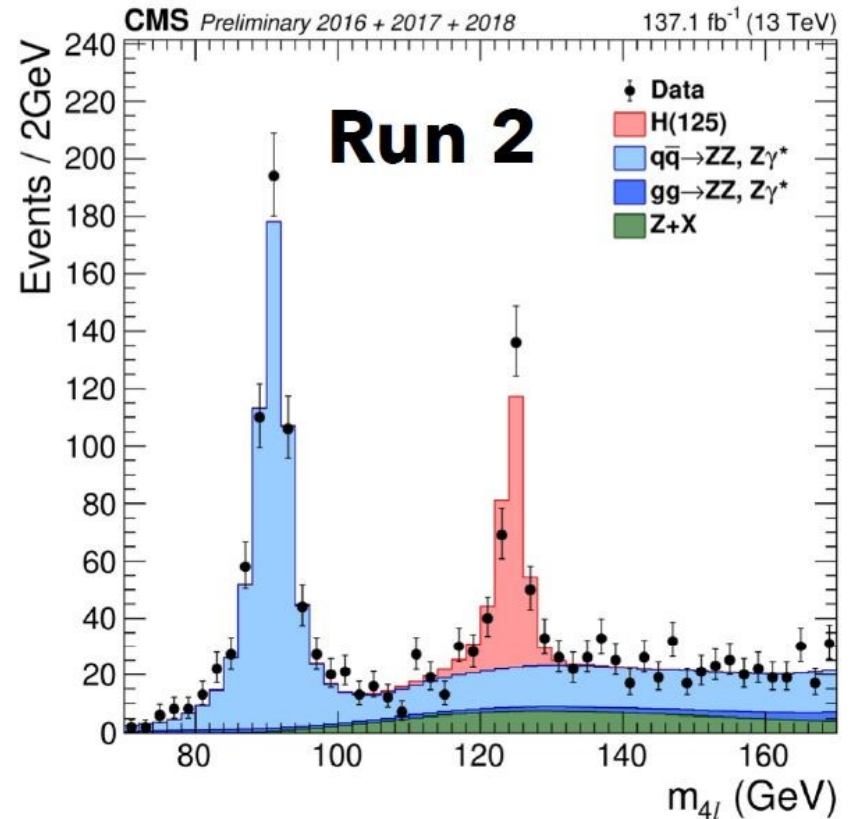
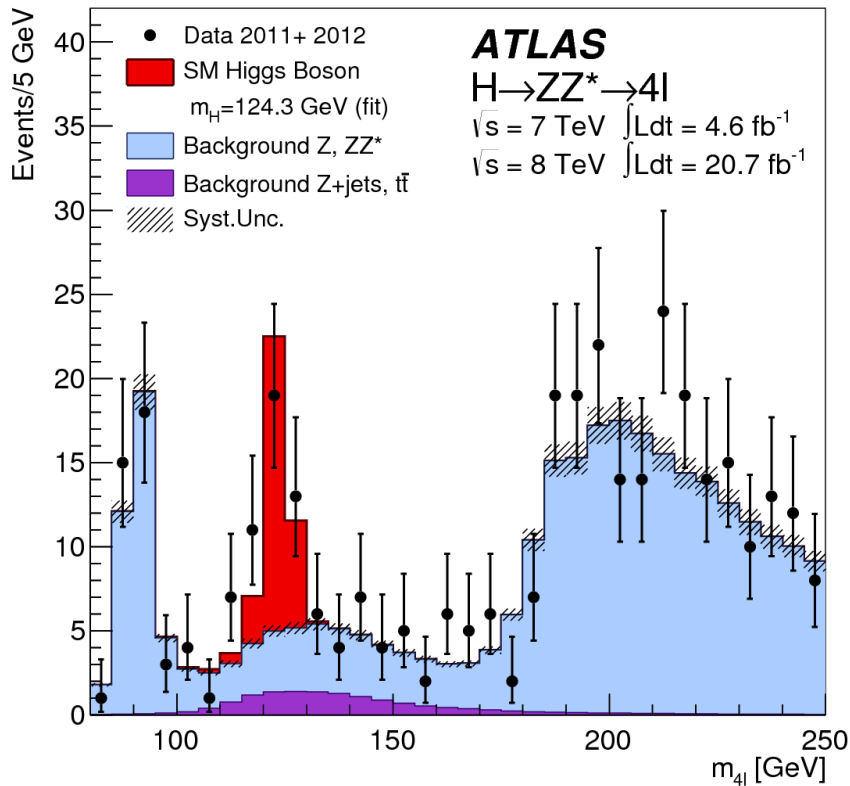


Wymiana bozonów W prowadzi do zmiany „zapachu” hadronów – prądy naładowane-rozpadły słabe



UWAGA! To jest największe tło dla produkcji bozonu Higgsa!

Obserwacja przypadków W^+W^- , Z^0Z^0



UWAGA! To jest największe tło dla produkcji bozonu Higgsa!

Podsumowanie

- Oddziaływania słabe odpowiedzialne za rozpady beta.
- Podobieństwo pomiędzy słabymi i elektromagnetycznymi (podobna stała sprzężenia).
- Unifikacja elektroslaba i 4 bozony (γ, Z^0, W^\pm).
- Najbardziej precyzyjne pomiary fizyki cząstek w procesach:

$$e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f\bar{f}$$
$$e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow f\bar{f}f\bar{f}$$

potwierdziły:

- liczbę pokoleń,
- uniwersalność leptonów
- mieszanie kwarków,
- ładunek kolorowy kwarków
- dały fundament do poszukiwania i wyznaczenia masy bozonu Higgsa