

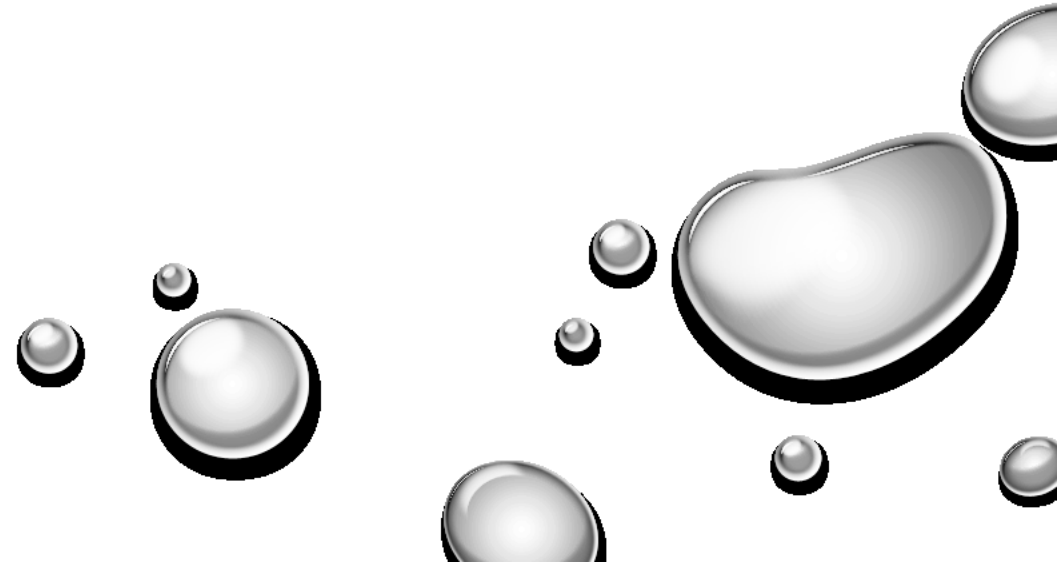


# CZĄSTKI ELEMENTARNE I ODDZIAŁYWANIA

## X ODDZIAŁYWANIA SŁABE I ELEKTROSŁABE

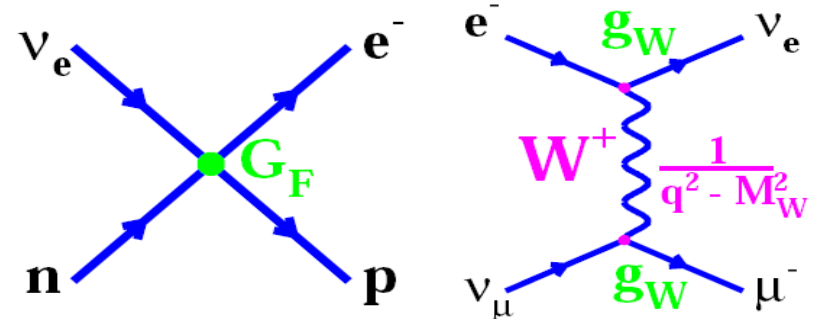
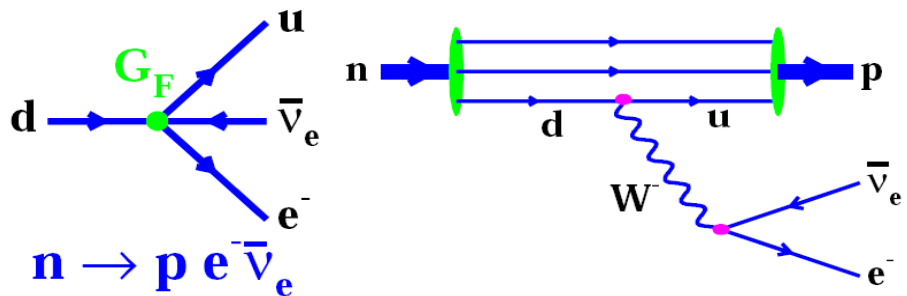
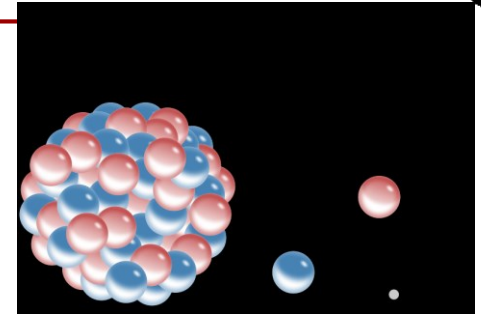
Agnieszka Obłąkowska-Mucha

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

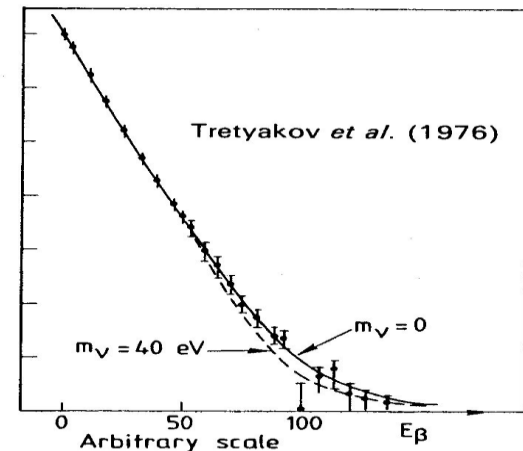


## Oddziaływania słabe

- Rozpady  $\beta$  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  $\beta$  uważane są jako zmianę kwarków  $u \leftrightarrow d$  spowodowaną emisją bozonu  $W^\pm$ :



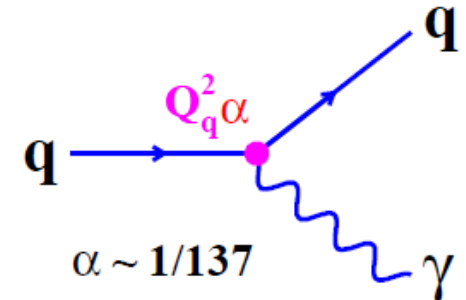
- Oddziaływania słabe są INNE niż elektromagnetyczne i silne:
  - są przenoszone przez ciężkie bozony
  - zmieniają rodzaj cząstki (leptonów i kwarków)
- WSZYSTKIE cząstki (również neutrino) oddziałują słabo



## Trzy oddziaływania - różne czy podobne?

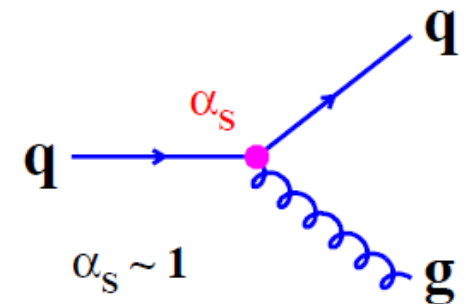
### ■ Oddziaływania elektromagnetyczne:

- ✓ pomiędzy kwarkami i naładowanymi leptonami
- ✓ przenoszone przez bezmasowy foton
- ✓ foton oddziałuje z ładunkiem elektrycznym,  $\alpha \approx 1/100$
- ✓ nie zmieniają rodzaju cząstek
- ✓ na odległości  $10^{-15}$  m  $F_{elm} \approx 200$  N



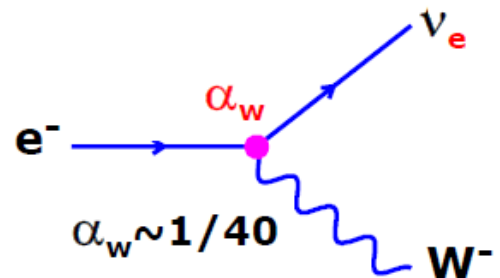
### ■ Oddziaływania silne

- ✓ 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

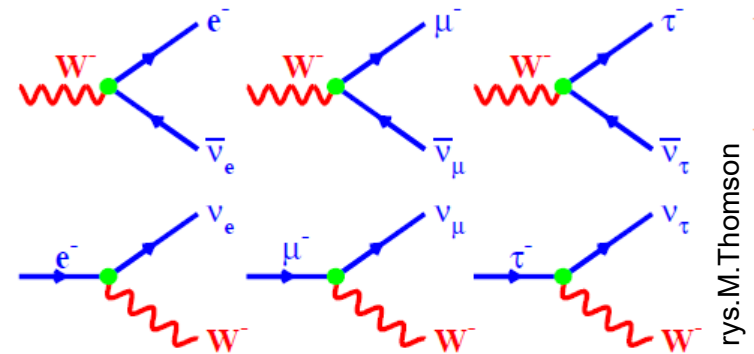
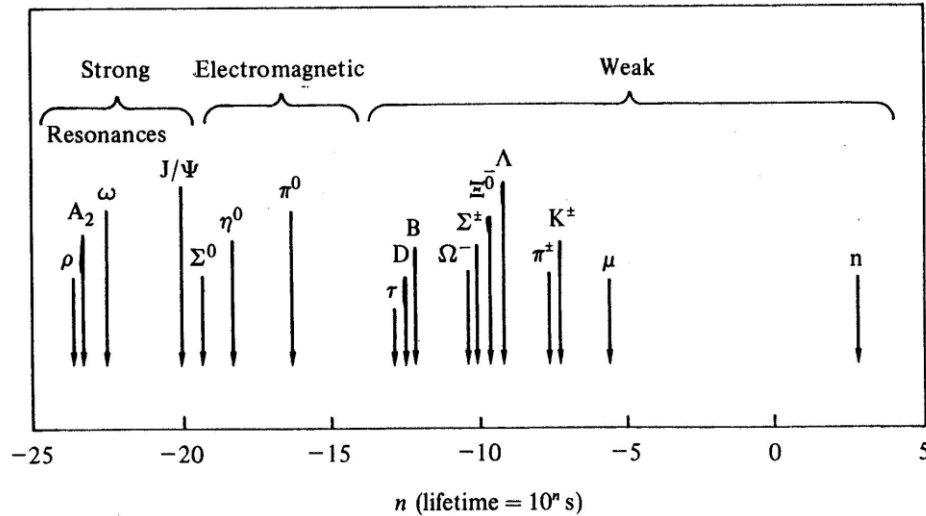
- ✓ pomiędzy kwarkami i wszystkimi leptonami
- ✓ przenoszone przez ciężkie bozony (bo mały zasięg),  $\alpha_w \approx 1/40$
- ✓ **zmieniają rodzaj cząstki**
- ✓ na odległości  $10^{-15}$  m  $F_{weak} \approx 0.002$  N



które oddziaływania są podobne?

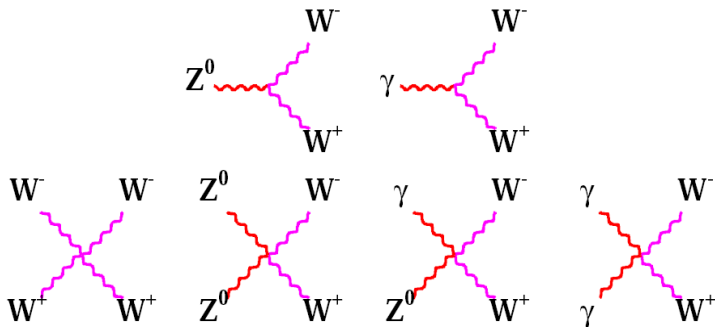
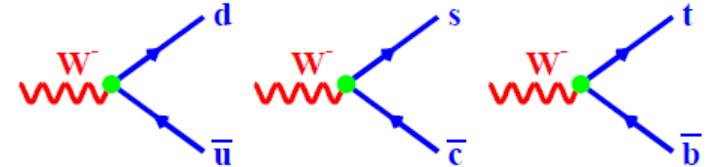
# Gdzie widzimy słabe rozpady?

Słabe rozpady są słabe, a więc cząstka żyje stosunkowo długo



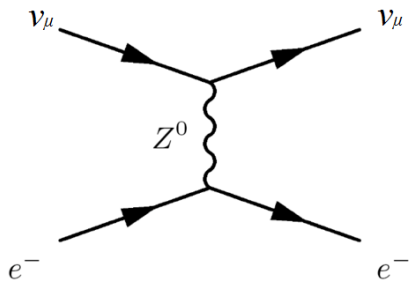
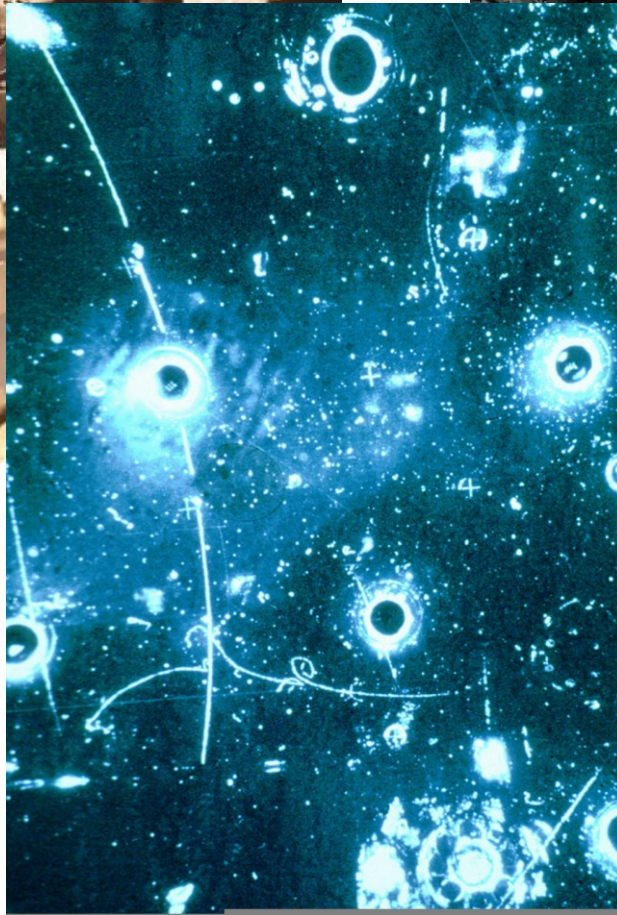
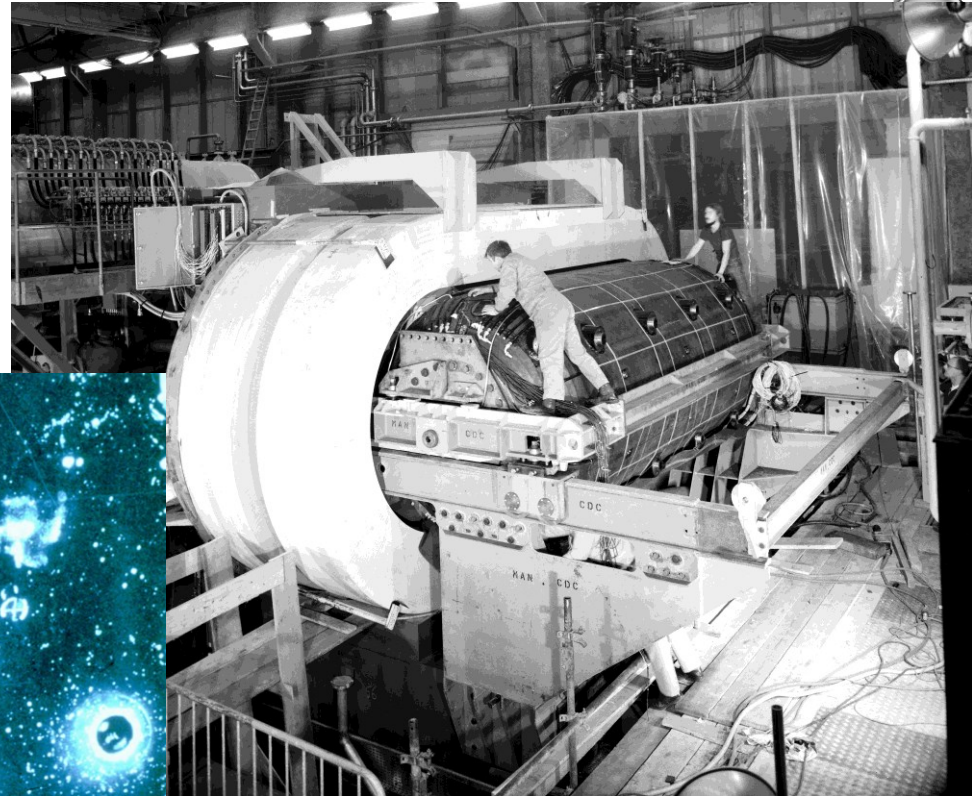
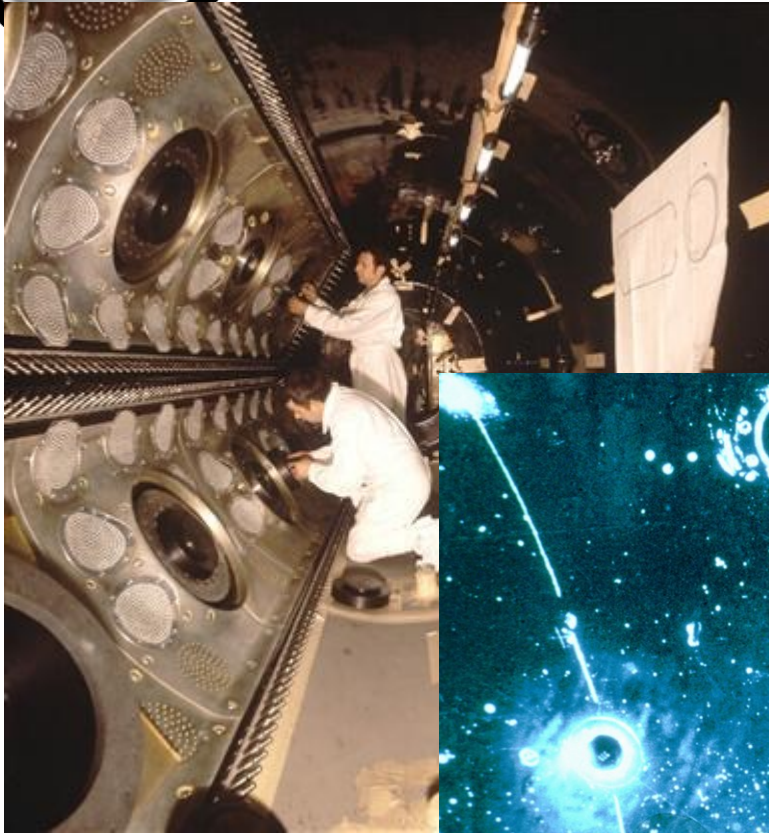
rys. M. Thomson

e.g.





# 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]

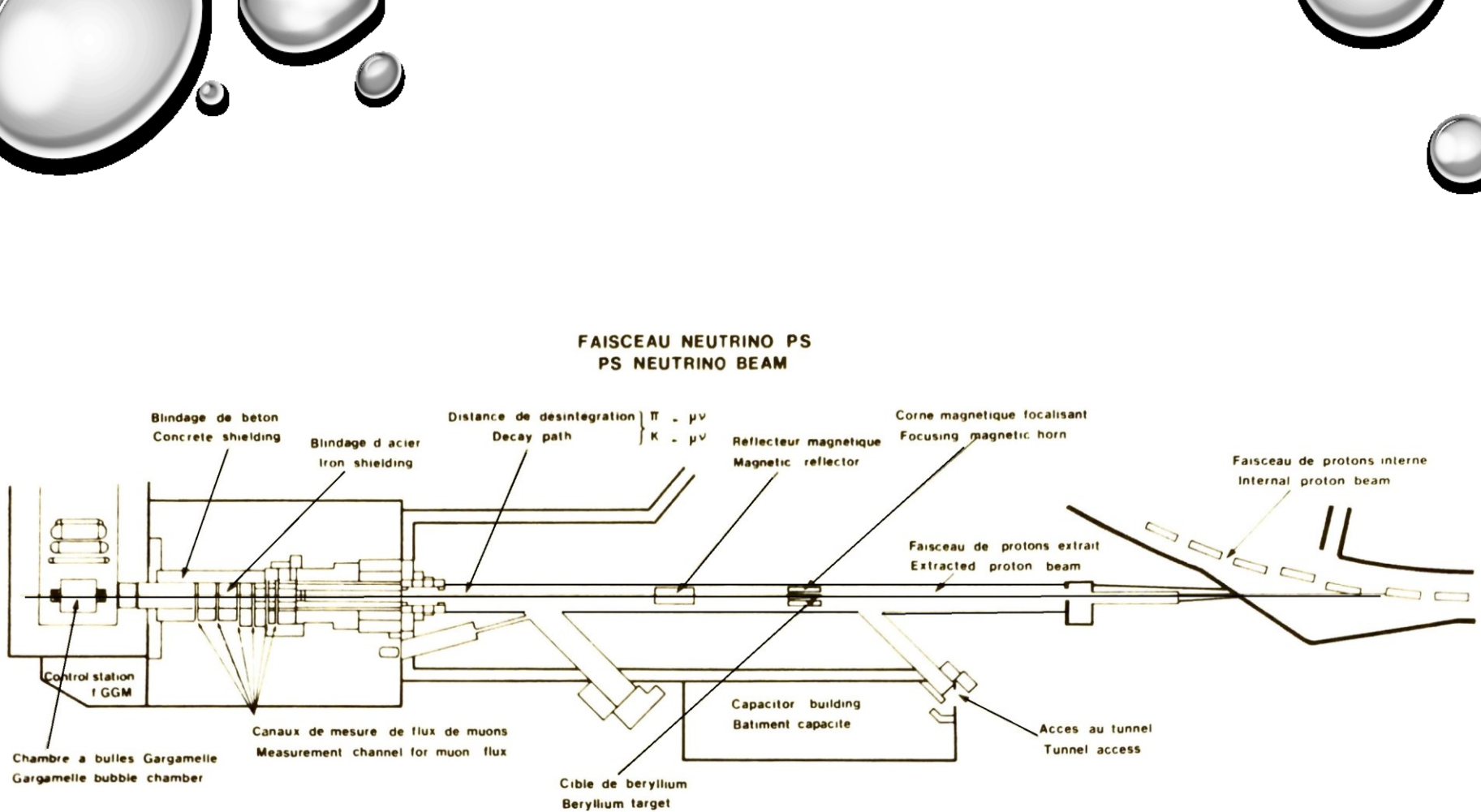
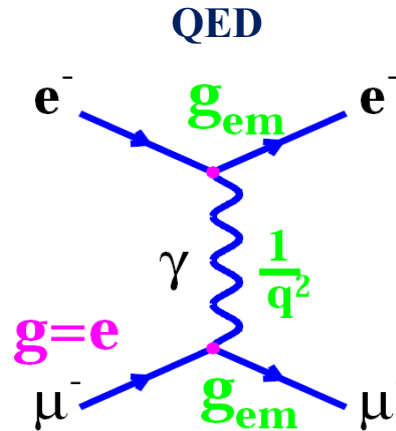
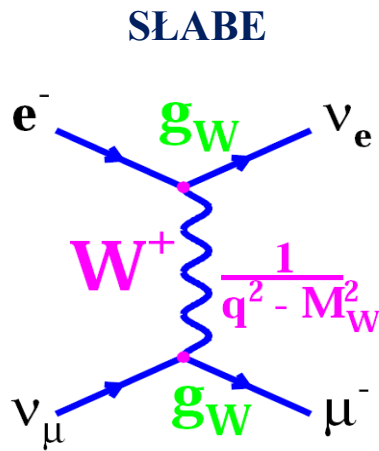


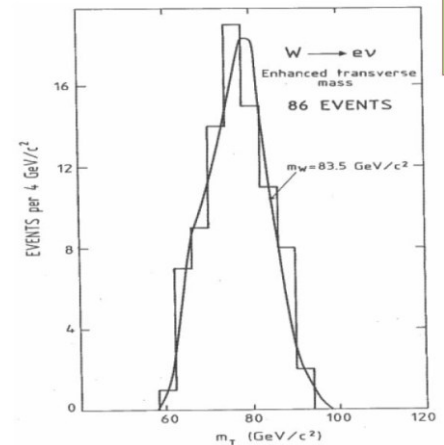
Fig. 1-2. The CERN neutrino beam lay-out.



## Słabe a elektromagnetyczne

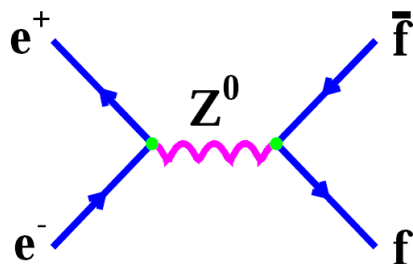


- dla niskich energii, gdy  $q^2 \ll M_W^2$  propagator w postaci  $\frac{1}{M_W}$  czyli punktowego oddziaływania Fermiego,
  - ciężki bozon oznacza krótki zasięg oddziaływania ,  
 $M_W = 80.4 \pm 0.1 \text{ GeV}$   
 $Z \approx 0.002 \text{ fm}$
  - wymieniany bozon przenosi ładunek elektromagnetyczny,
  - 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**.



$$\alpha_s \approx 0.2$$

$$\alpha_W \approx 0.03$$

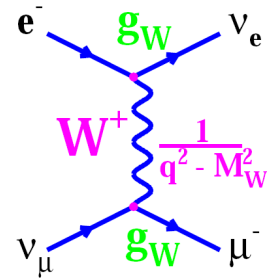
$$\alpha_{elm} \approx 0.01$$



## Po co aż trzy bozony?

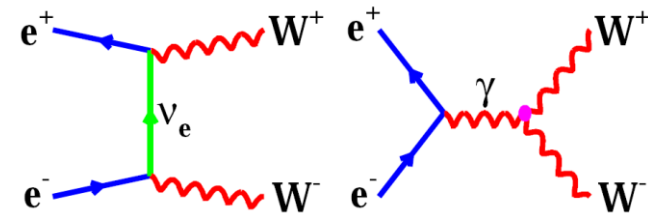
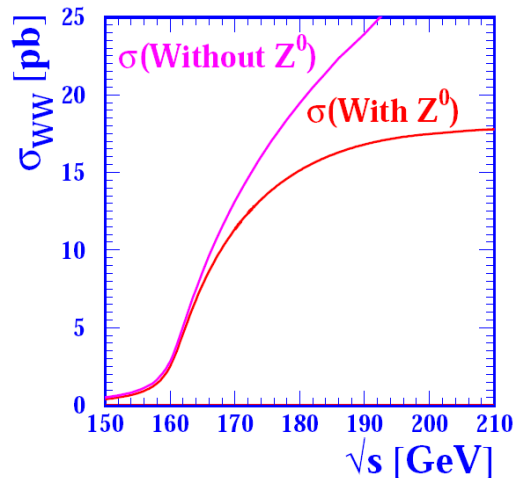
Przy rozpraszaniu neutrino-elektron wg. teorii Fermiego, przekrój czynny zmierza do nieskończoności.

- 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

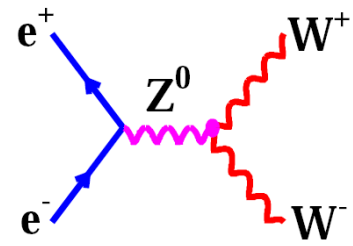


Oddziaływanie zachodzi poprzez wymianę bozonów pośredniczących – fotonu,  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$ , które są ze sobą związane.

Jedynie taka teoria opisuje wyniki doświadczalne i przewiduje nowe efekty.



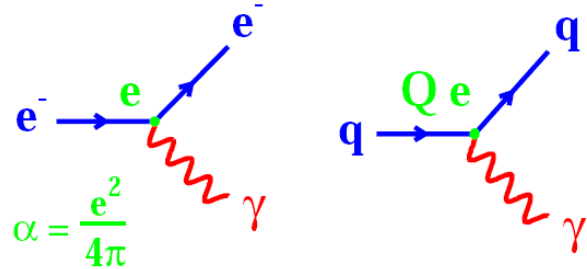
interferencja dwóch diagramów



# Procesy z Modelu Standardowego

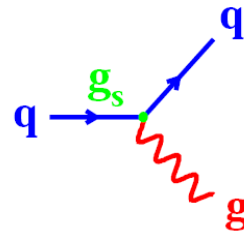
W ramach MS opisujemy elementarne fermiony ich oddziaływania:

## ELEKTROMAGNETYCZNE



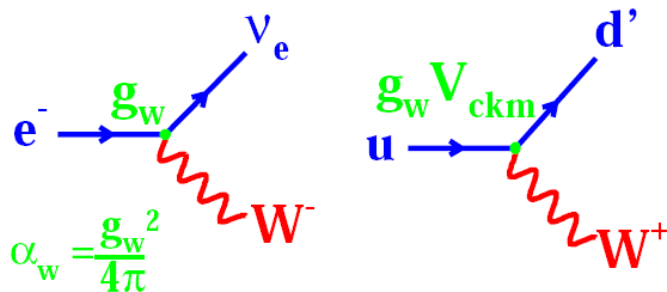
ładunek elektryczny

## SILNE

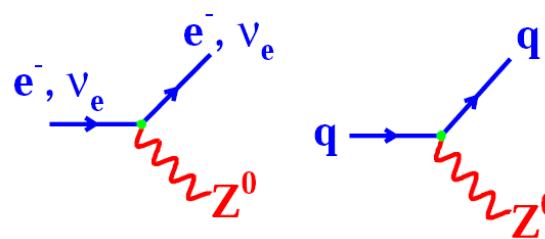


ładunek silny

## SŁABE CC (charge current)

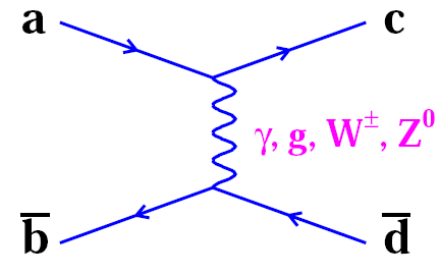


## SŁABE NC (neutral current)

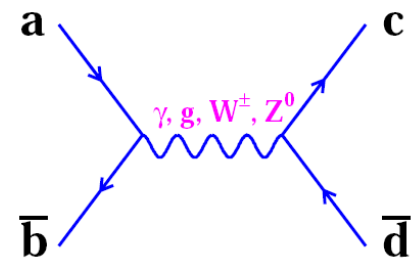


**zmieniają rodzaj kwarków pomiędzy generacjami !**

## rozpraszanie



## anihilacja



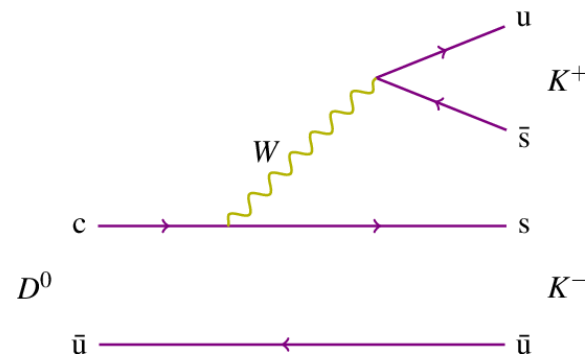
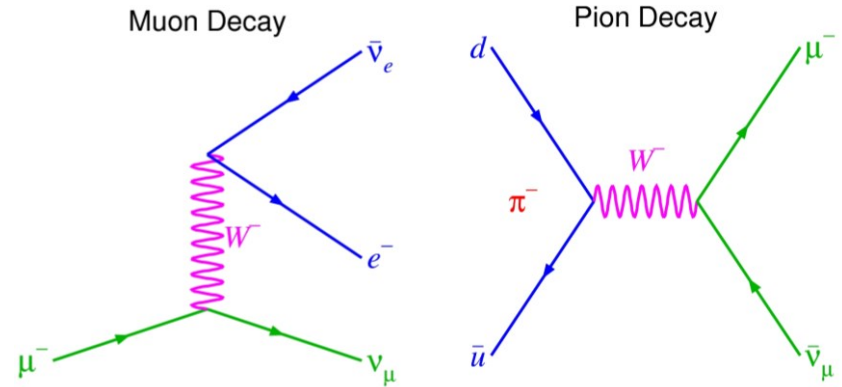
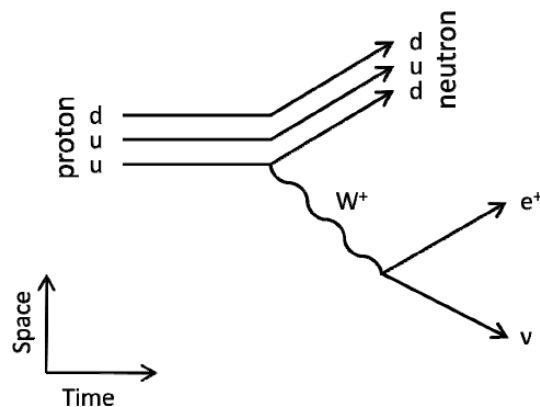
# Oddziaływania słabe - klasyfikacja

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

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

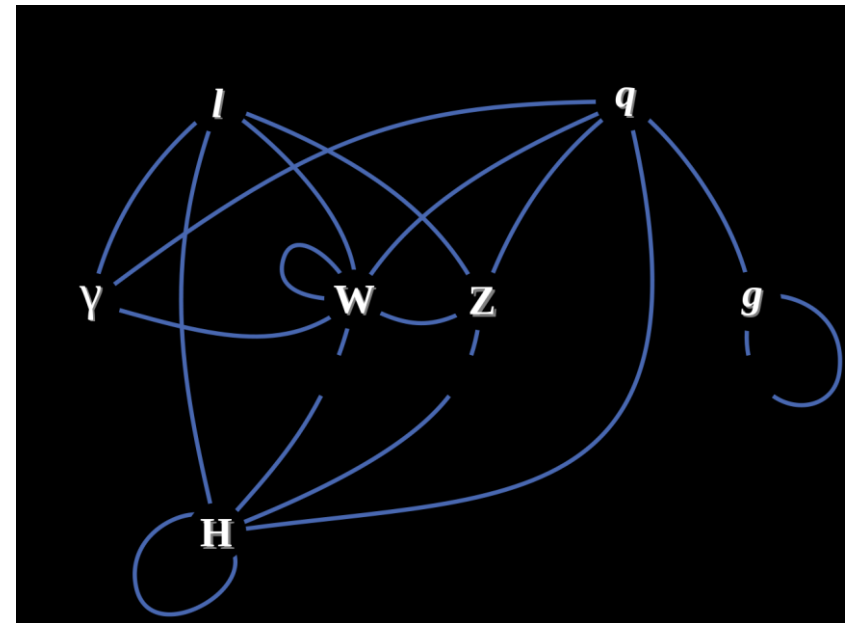
- półleptonowe:  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$   
 $p \rightarrow n e^+ \nu_e$   
 $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$

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



# Model Standardowy

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



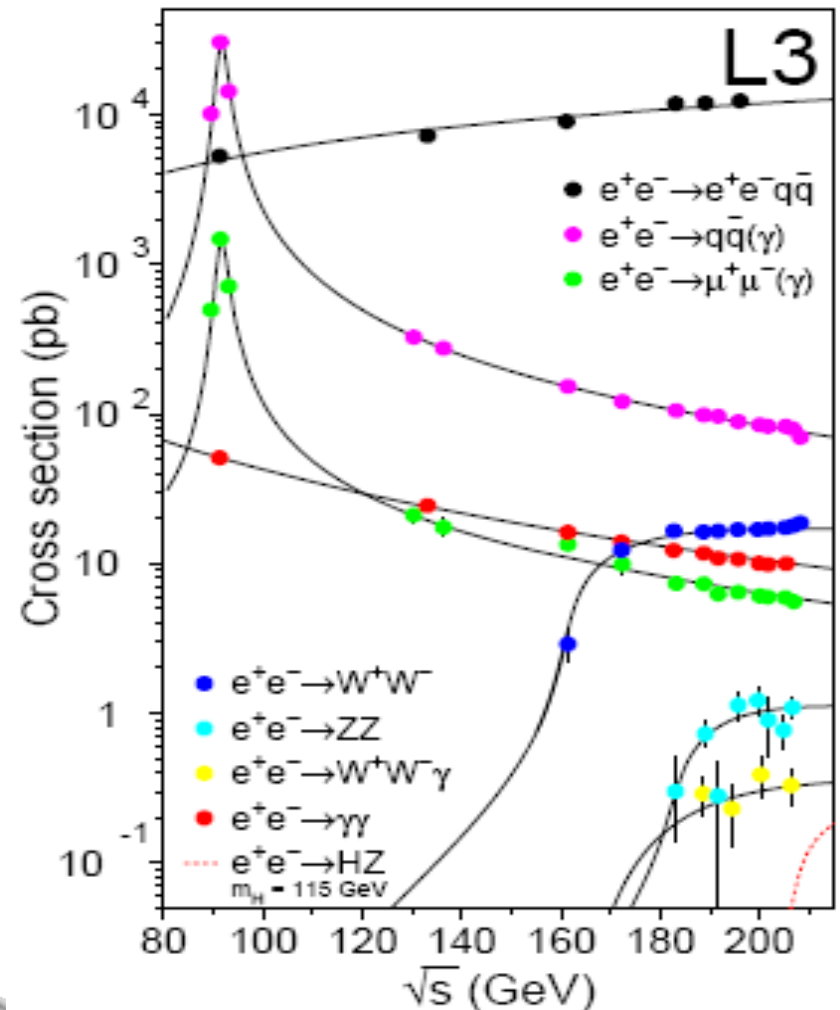
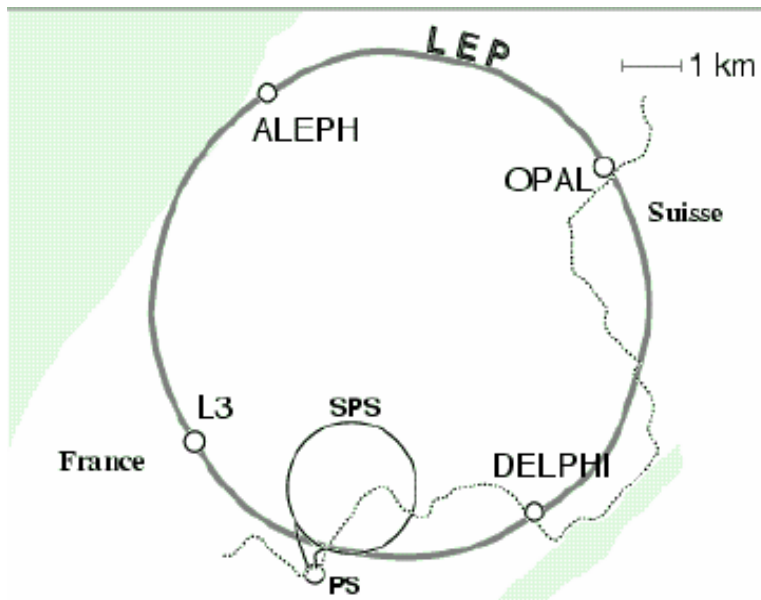
[https://pl.wikipedia.org/wiki/Model\\_standardowy](https://pl.wikipedia.org/wiki/Model_standardowy)



# Fizyka elektrośłaba na LEP

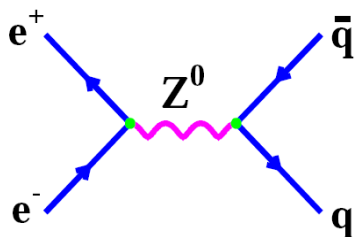
## zderzenia elektron-pozyton na LEPie (1975 - 1989 - 2000)

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

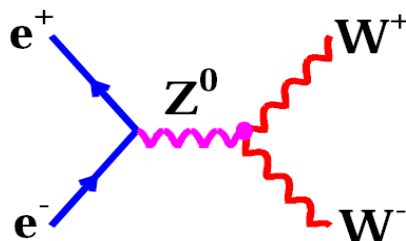


# Fizyka na LEPie

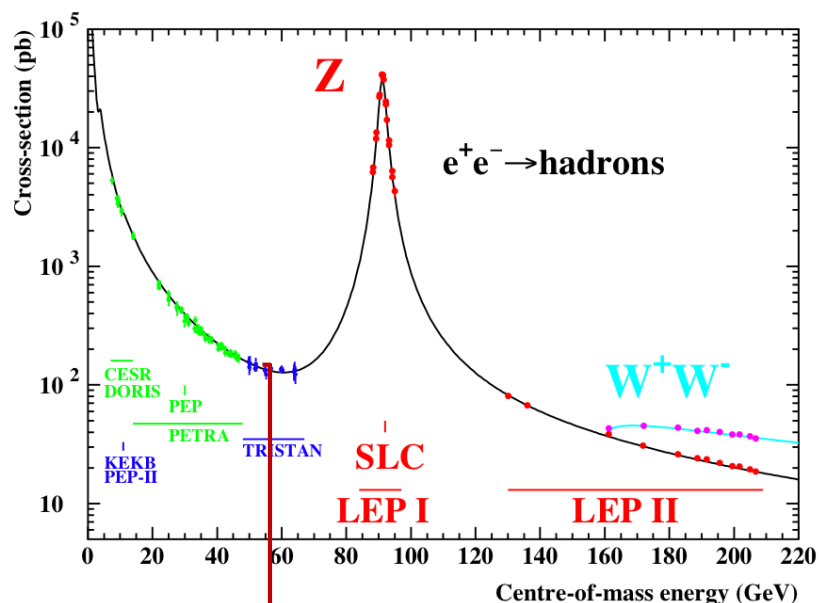
## Podstawowe diagramy



niskie energie (LEP I)



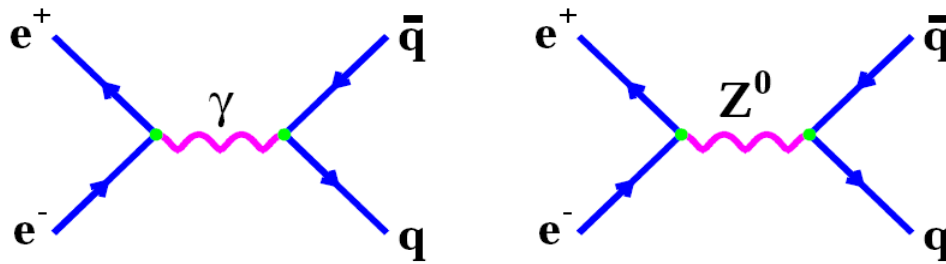
wysokie energie (LEP II)



- 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)

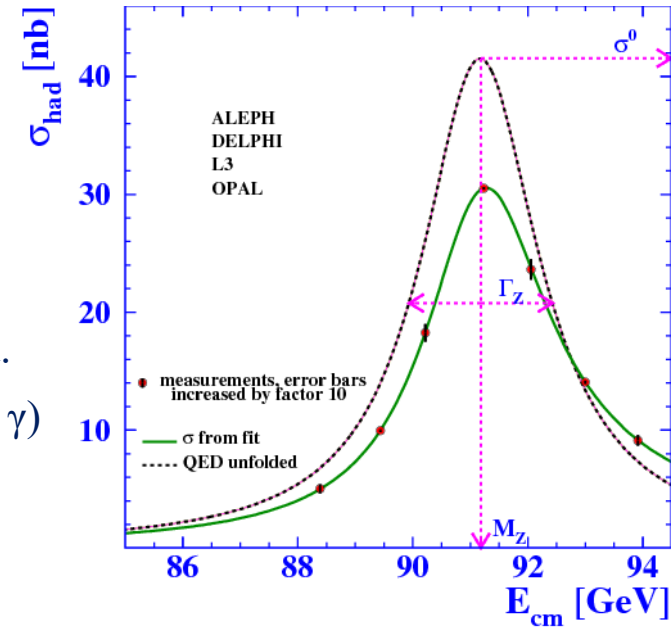


- Przy niższych energiach –  $\sqrt{s} < 50$  GeV – tylko wymiana fotonu.
- Przy wyższych energiach – wymiana  $Z^0$  oraz interferencja ( $Z^0, \gamma$ )
- $Z^0$  rozpada się z czasem  $10^{-25}$  s – rezonans Breita -Wignera.

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  $\Gamma_Z$   
przekroju czynnego dla piku  $\sigma_0$



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

## Przekrój czynny $e^+e^-$

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

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

Całkowita szerokość – suma szerokości na poszczególne stany końcowe

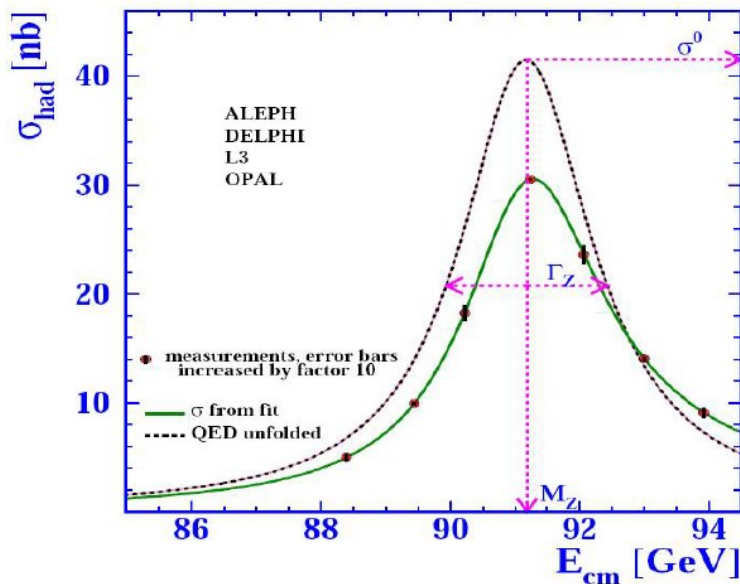
$$\Gamma_Z = \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{q\bar{q}} + \Gamma_{\nu\bar{\nu}}$$

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

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



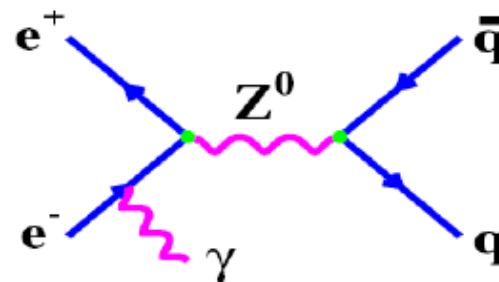
## Wyznaczenie kształtu linii $Z^0$



„poprawki radiacyjne”:

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

Krzywą doświadczalną należy przeskalować o poprawki związane z QED.



Najbardziej precyzyjne wyniki HEP:

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

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

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

## 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.

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

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

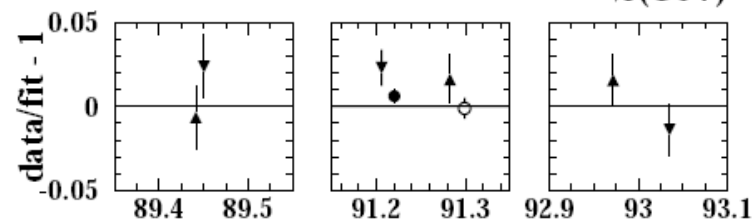
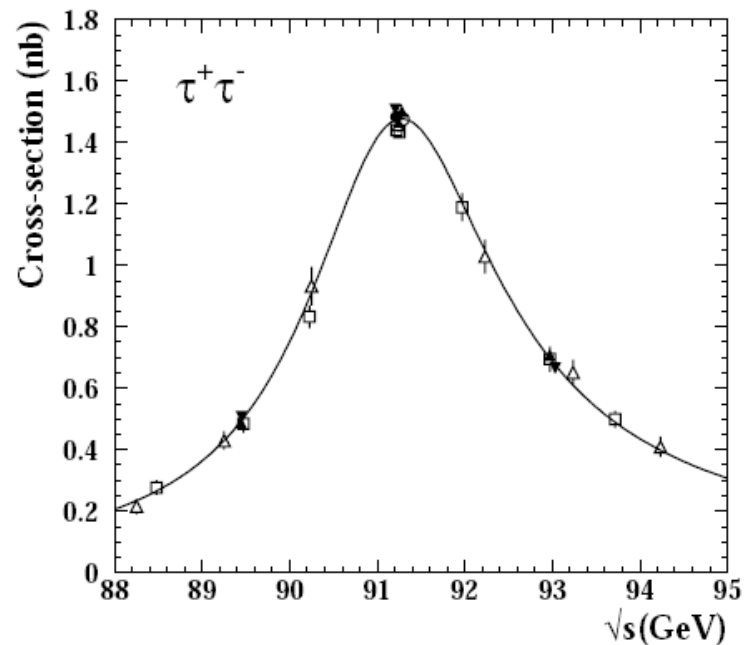
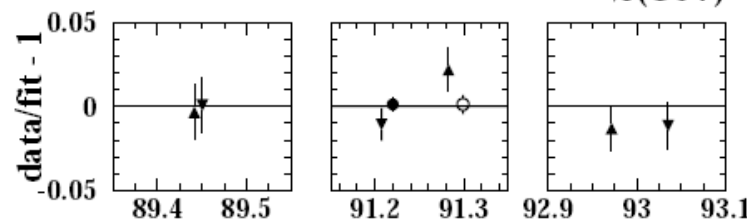
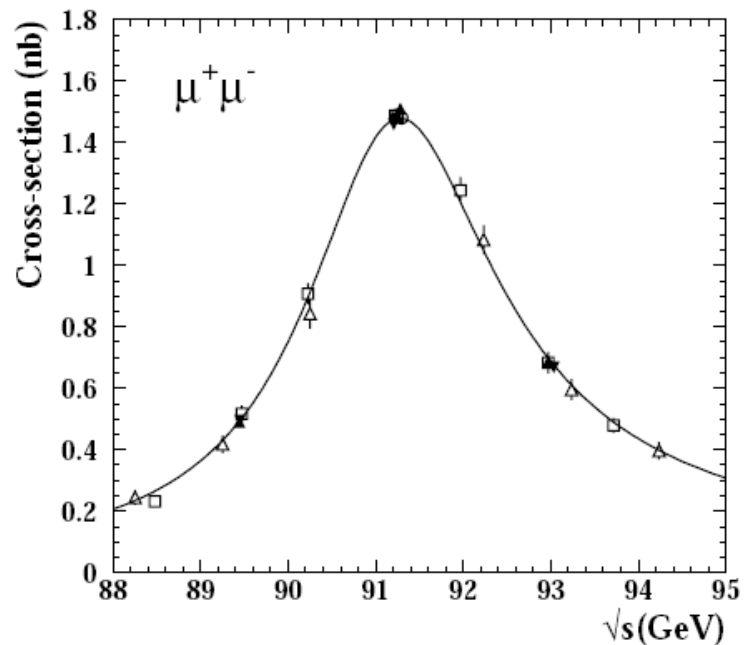
- Następnego pokolenia neutrin nie zaobserwujemy bezpośrednio, ale jego istnienie zwiększy całkowity przekrój czynny i całkowitą szerokość  $Z^0$ . Ale neutrin i tak nie widzimy, więc widzialna część przekroju czynnego ZMNIJSZY SIĘ !
- W maksimum mamy:

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

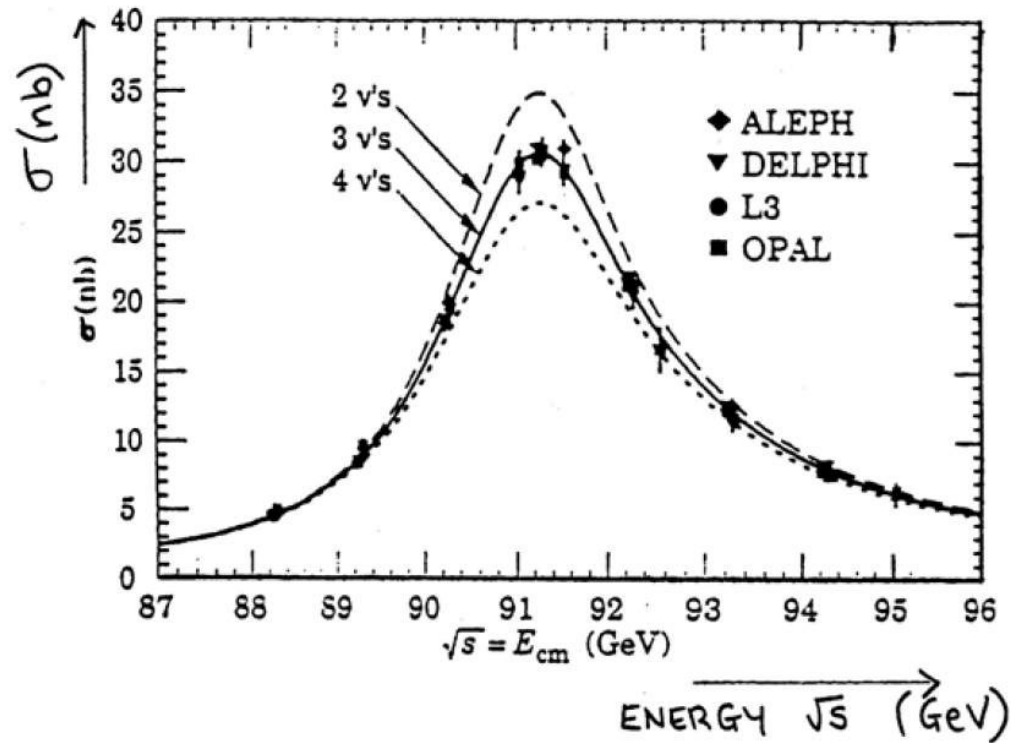
# Pomiar liczby neutrin

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

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



## Pomiar liczby neutrin



W dostępnych zakresach energii istnieją 3 pokolenia neutrin.

Szerokości cząstkowe dla leptonów potwierdzają uniwersalność leptonów.

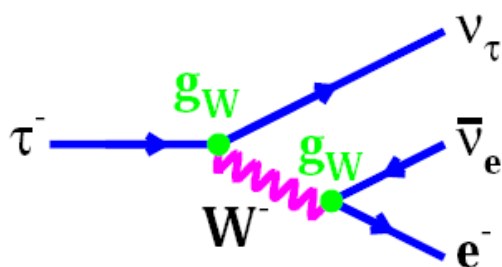
Szerokość dla kwarków potwierdza kolor.



## Uniwersalność leptonów

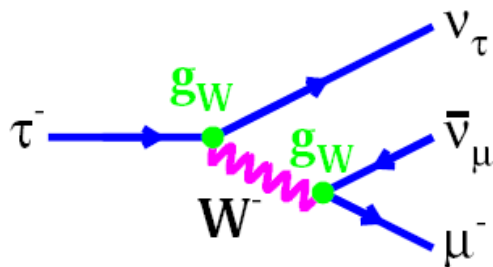
Popatrzmy dalej na rozpady leptonu  $\tau$  – jest on tak ciężki, że może rozpaść się również na hadrony.

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



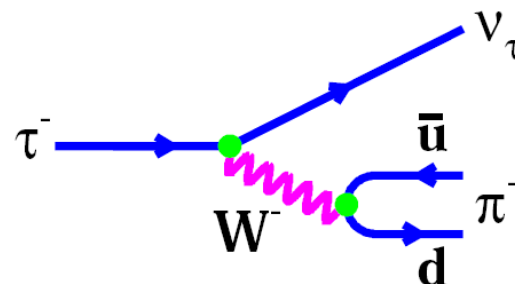
$$17.8 \pm 0.1\%$$

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



$$17.3 \pm 0.1\%$$

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



$$10.9 \pm 0.1\%$$

obliczenia czasu życia i stałej sprzężenia dla  $\tau$  pokazują:

**UNIWERSALNOŚĆ LEPTONÓW.**

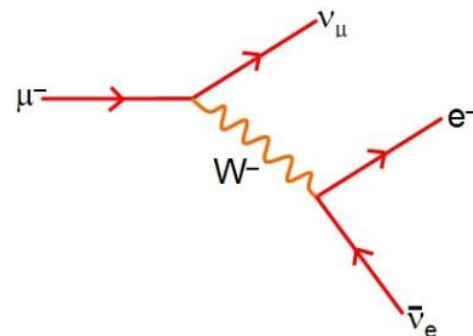
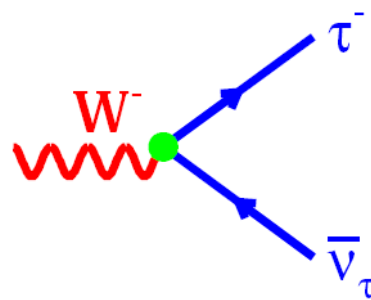
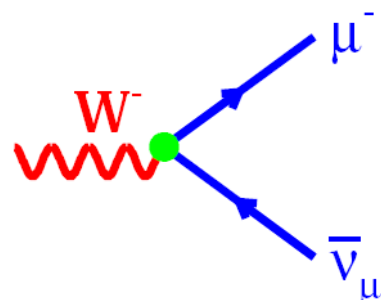
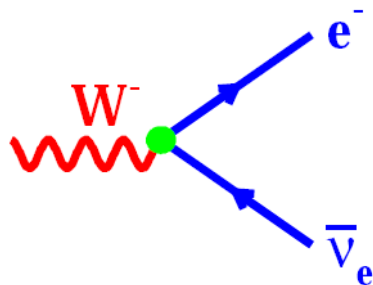
Naładowane prądy w tych rozpadach są TAKIE SAME dla wszystkich leptonów.

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

## Słabe rozpady leptonów

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

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

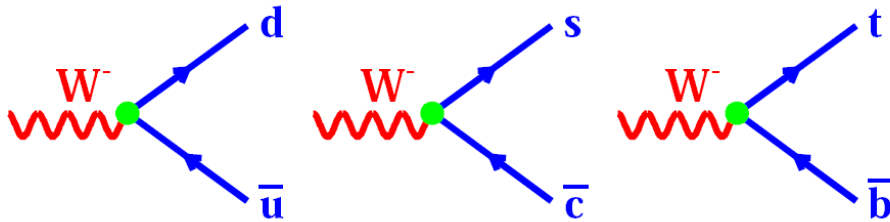


BRAK:  $W \rightarrow e^- \nu_\mu$

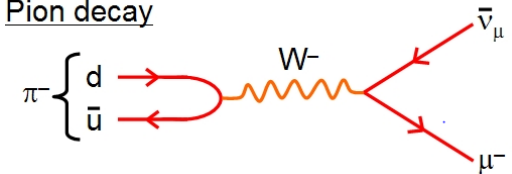
nie ma oddziaływań pomiędzy leptonami z różnych pokoleń

## Słabe rozpady kwarków

Podobnie mogłoby być dla kwarków:

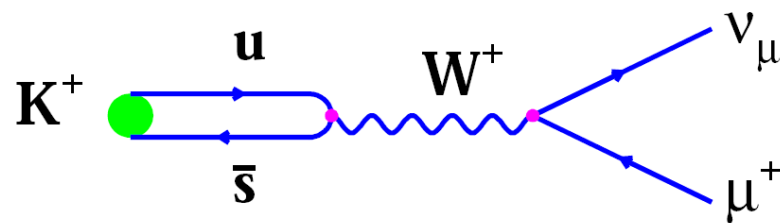


Pion decay



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

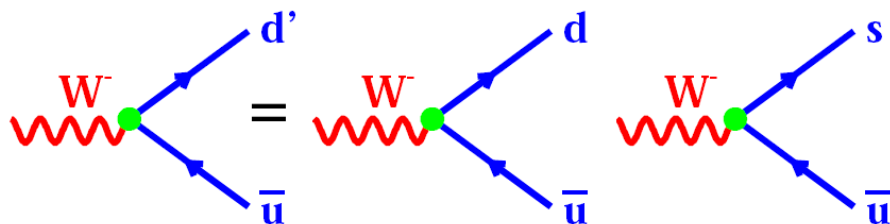
w którym widać wierzchołek  $W^+ \rightarrow u \bar{s}$  ze **ZMIANĄ POKOLENIA!**



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)**

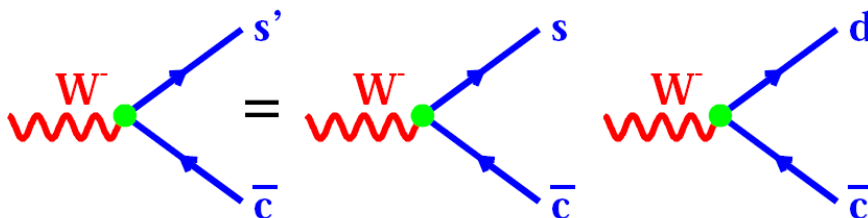
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

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

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

kąt mieszania (kąt Cabbibo)

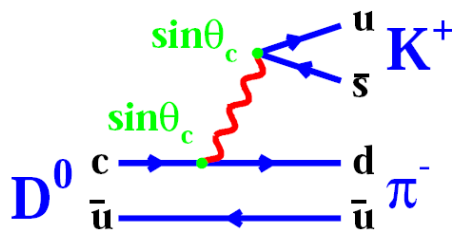
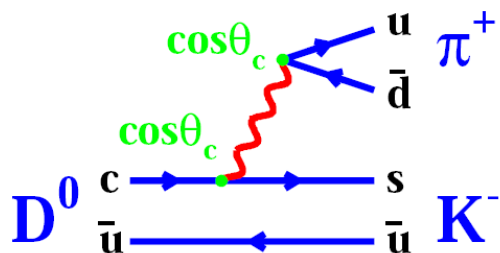
$$\theta_c = 13^\circ$$





## Tłumienie w słabych rozpadach

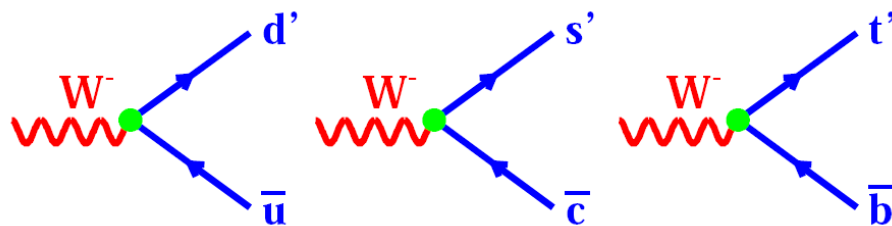
Wprowadzenia kąta mieszania doskonale tłumaczy tłumienie występowania niektórych rozpadów:



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

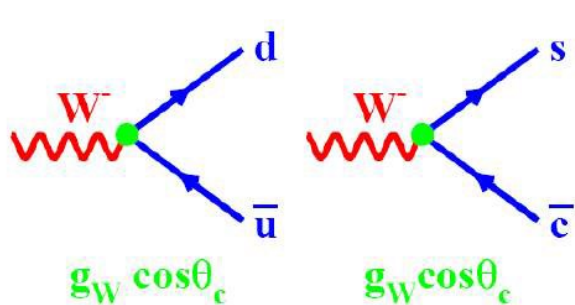
# Macierz CKM

Uogólnienie na trzy rodziny kwarków:

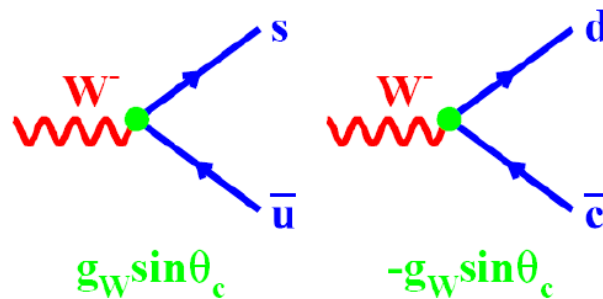


$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

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

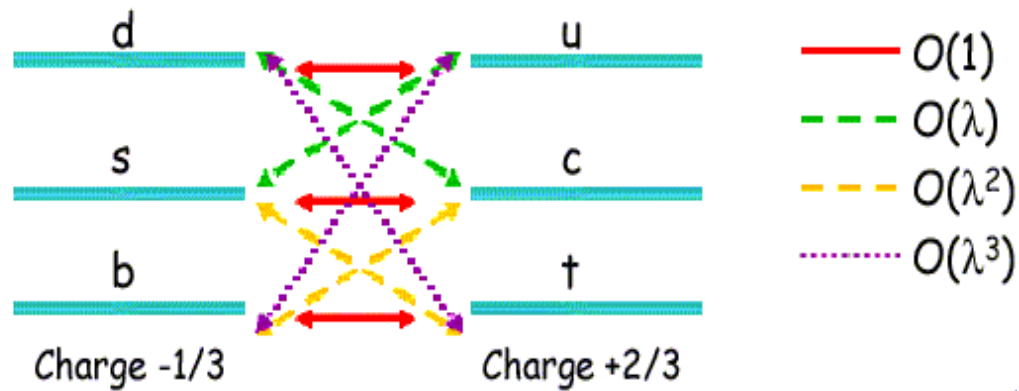
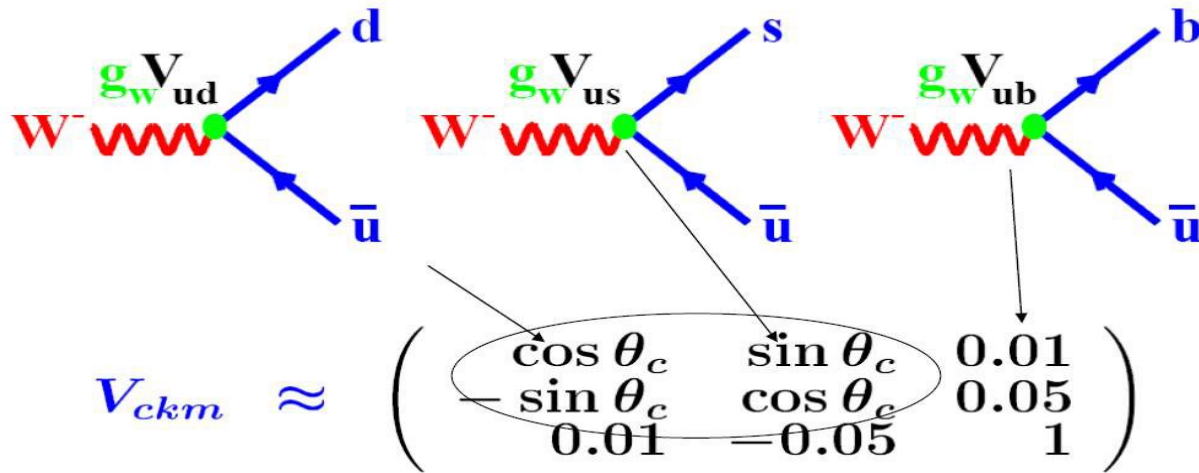


$$|M|^2 \propto \cos^2 \theta_c$$



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

# Macierz CKM

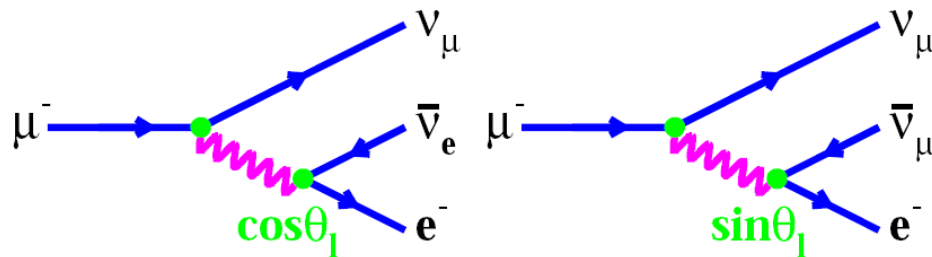


## Mieszanie leptonów?

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

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

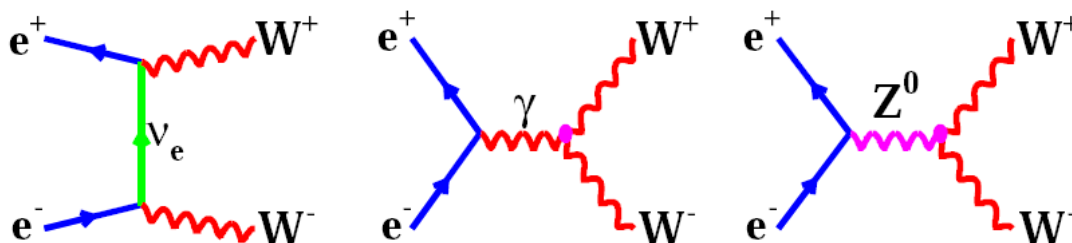
Sukces macierzy mieszania – koncepcja **mieszania leptonów**?



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

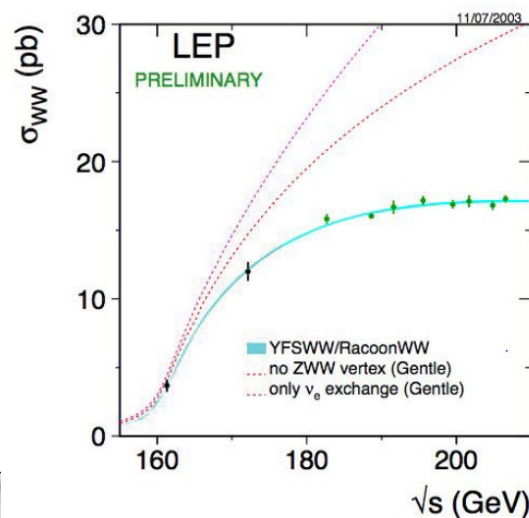
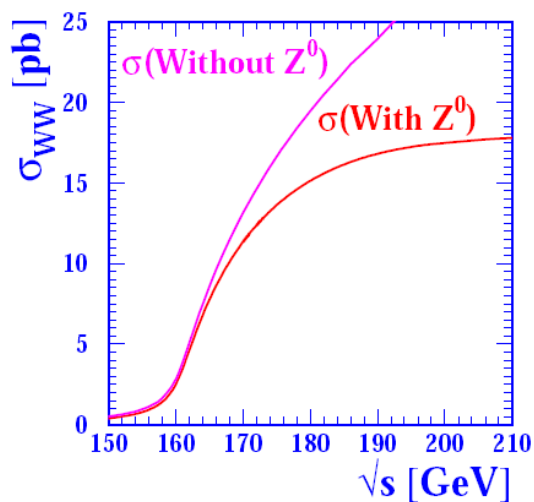
## LEP II

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:

			<b>3 TIMES</b>		
<b>e</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau</math></b>	<b>u</b>	<b>c</b>	<del><b>t</b></del>
<b><math>\nu_e</math></b>	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b><math>\nu_\tau</math></b>	<b>d</b>	<b>s</b>	<del><b>b</b></del>

i spodziewamy się ich w stosunkach:

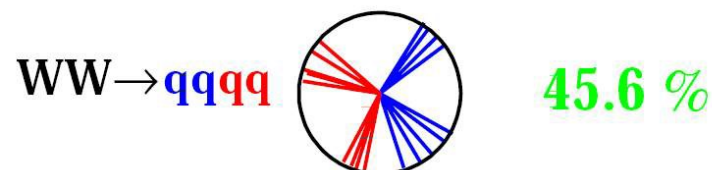
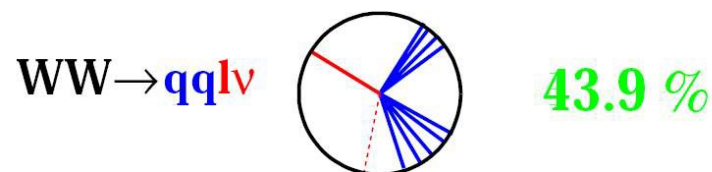
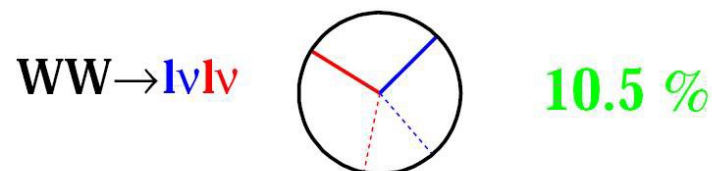
$$\text{Br}(W^\pm \rightarrow q\bar{q}) = \frac{2}{3}$$

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

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.*



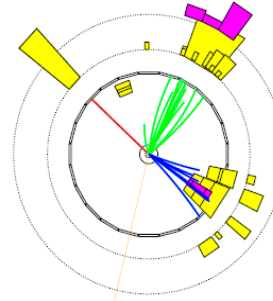
## Masa i szerokość $W^\pm$

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.

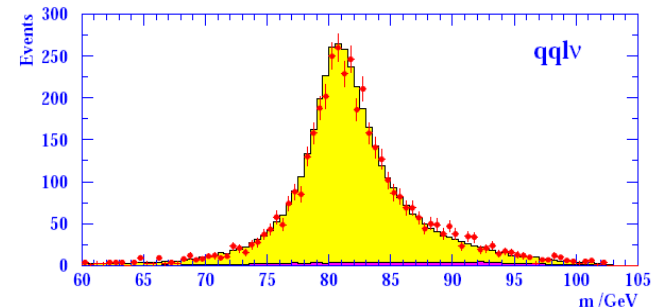
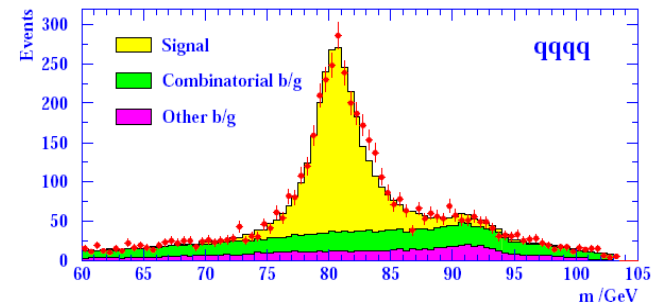
$$M_W = 80.423 \pm 0.038 \text{ GeV}$$

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



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

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



# Fizyka modelu elektroslabego

- Pomiary na LEPie są najdokładniejszymi testami Modelu Standardowego.

$\alpha_{em}$

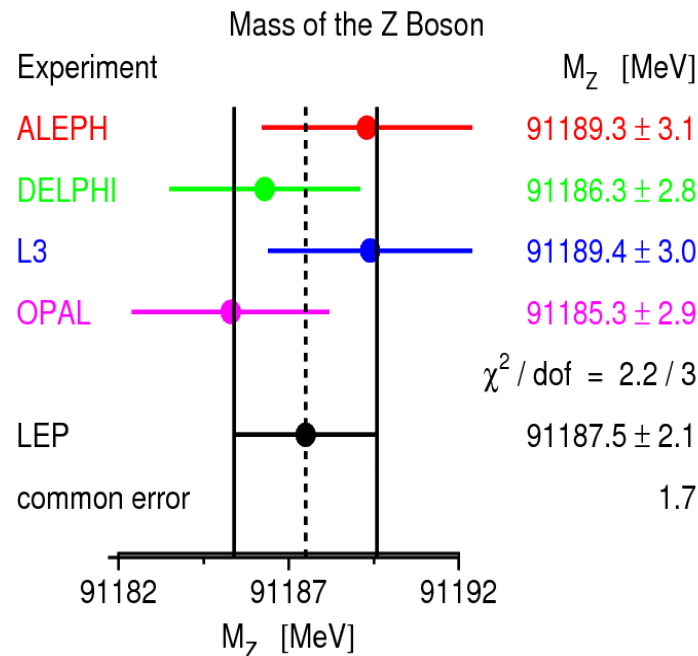
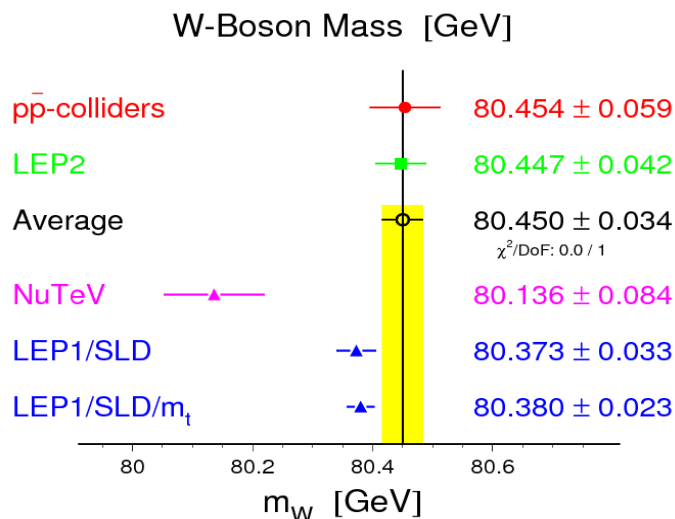
$$G_F = (1.16632 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

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

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

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

- Wyznaczono większość parametrów MS.



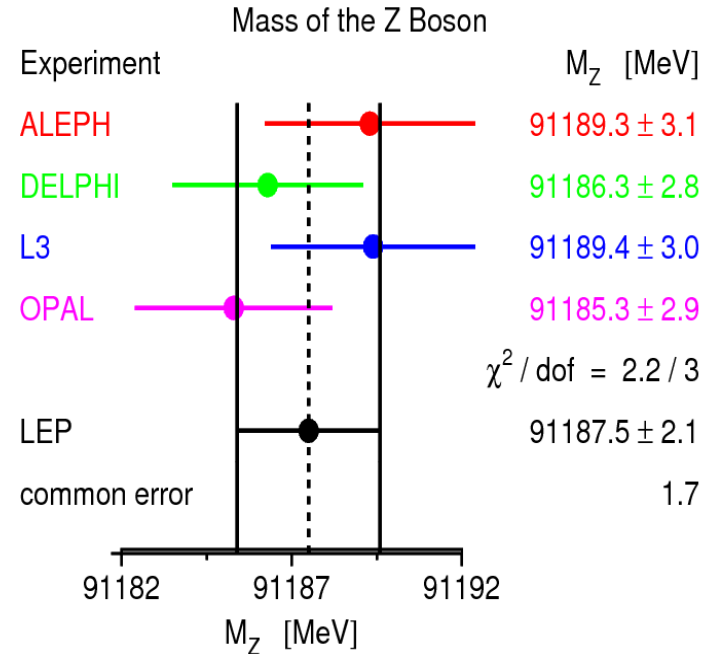
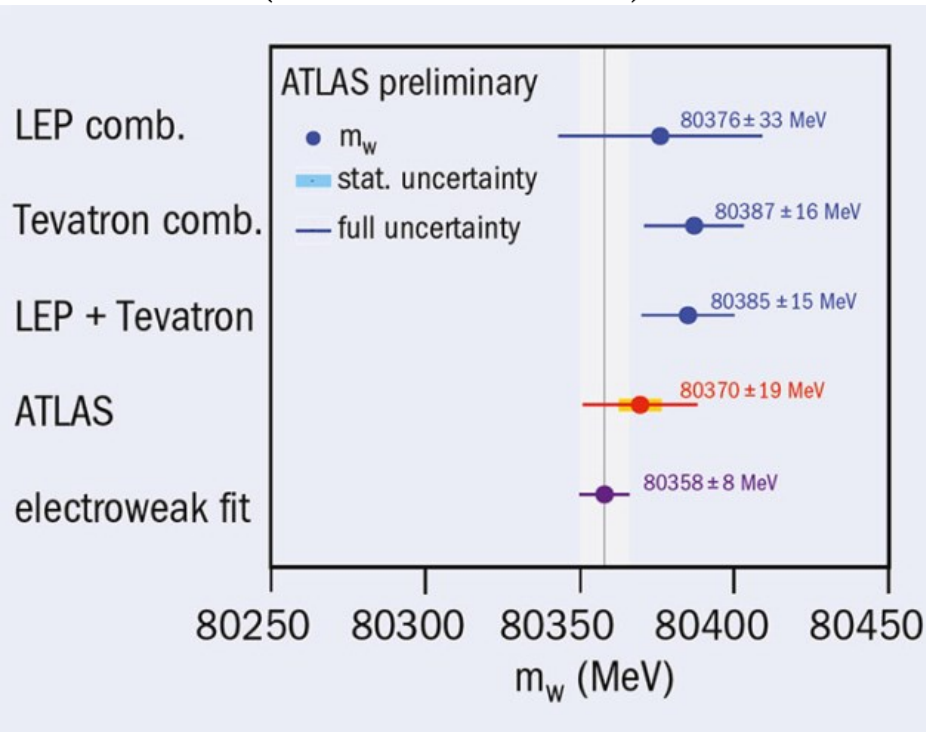
# Fizyka modelu elektroslabego

Pomiary na LEPie są najdokładniejszymi testami Modelu Standardowego.

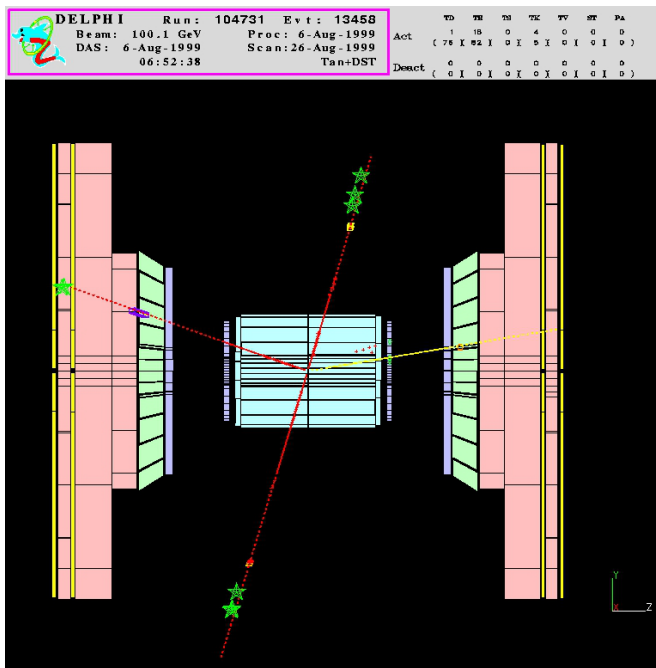
$\alpha_{em}$

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

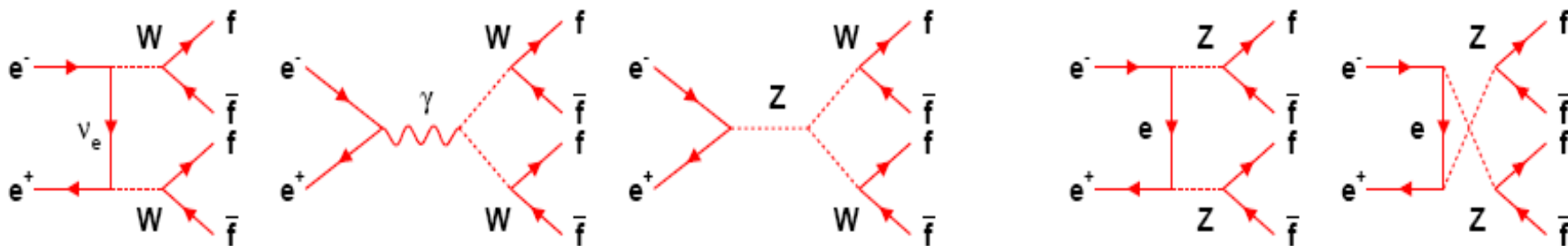
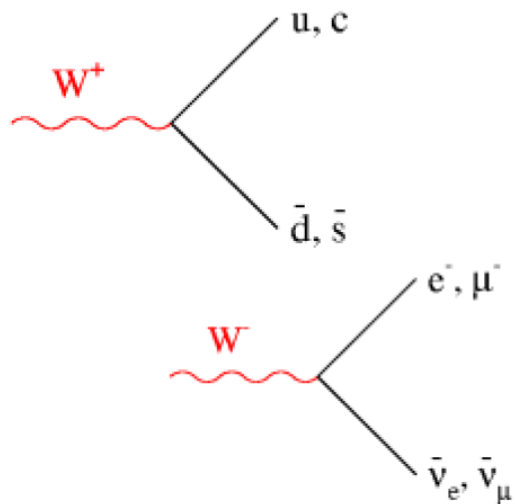
$$M_W = (80.423 \pm 0.038) \text{ GeV}$$



# Obserwacja przypadków $W^+W^-$

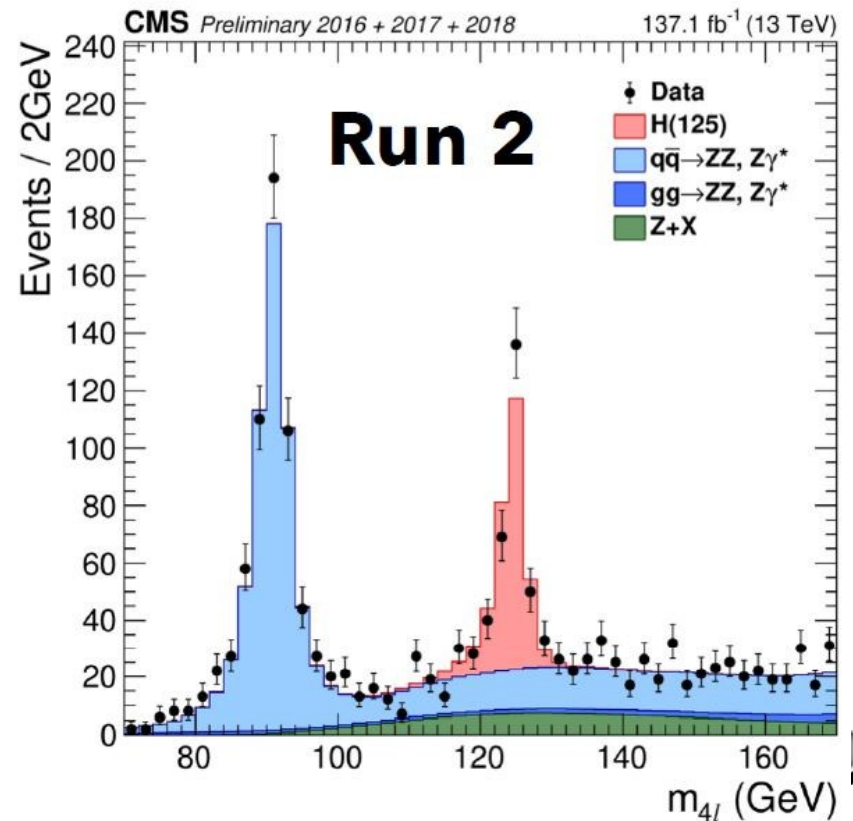
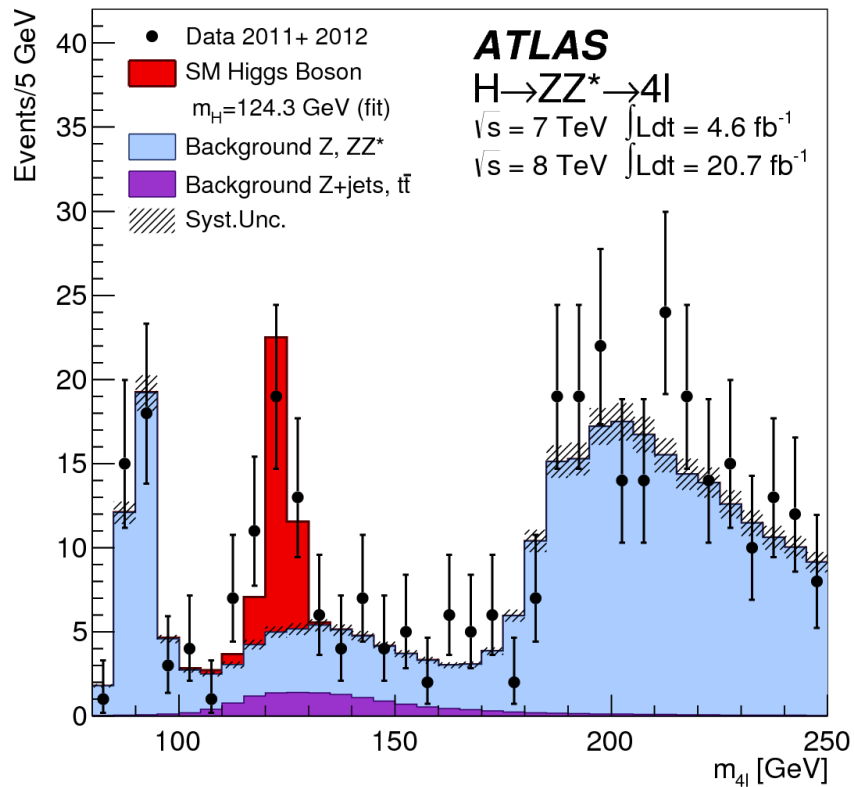


Wymiana bozonów W prowadzi do zmiany „zapachu” hadronów – prądy naładowane-rozpadły słabe



**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 ( $\gamma, Z^0, W^\pm$ ).
- 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