



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
AGH UNIVERSITY OF KRAKOW

Model Standardowy

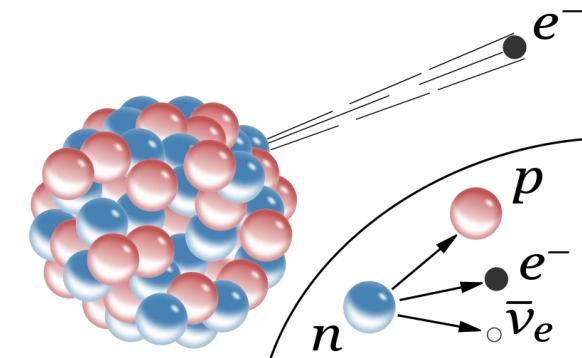
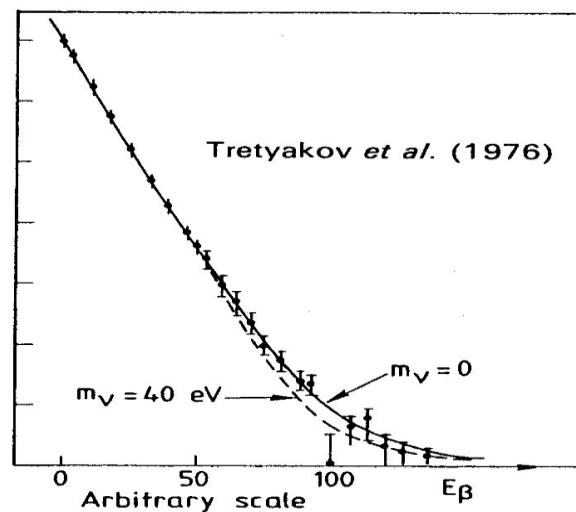
Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

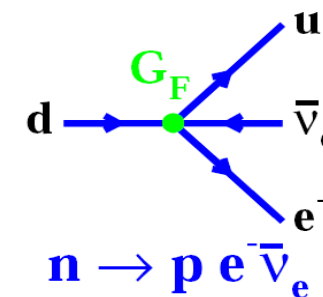
Oddziaływania elektroslabe
Oscylacje zapachu

Oddziaływania słabe

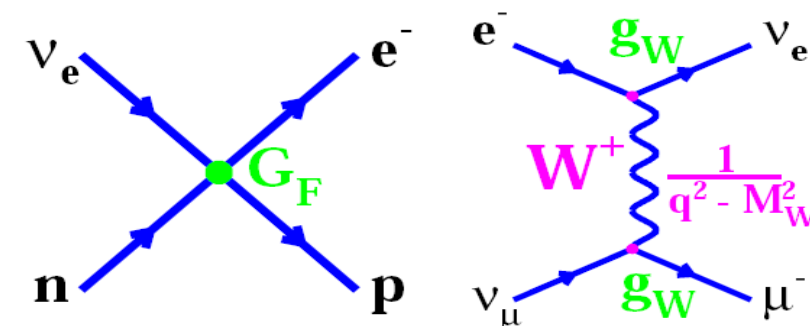
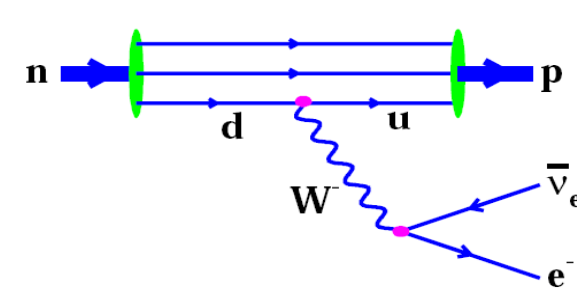
- Rozpady β zachodzą poprzez oddziaływania słabe:
 - neutron zmienia się w proton i emituje elektron i neutrino
- 1930 – W. Pauli zaproponował hipotezę neutrino (odkryte w 1956)
- Obecnie rozpady β uważane są jako zmianę kwarków $u \leftrightarrow d$ spowodowaną emisją bozonu W^\pm :



niskie energie (jądro)
teoria Fermiego

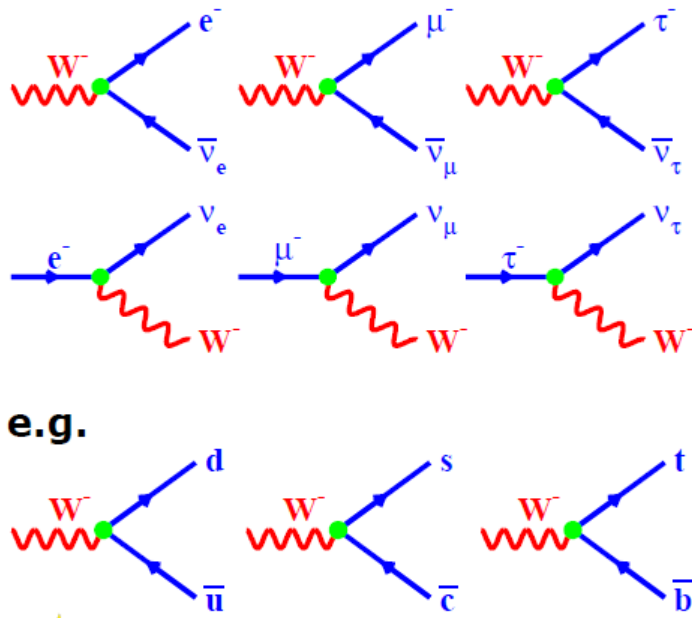


wysokie energie
(oddz. elektrosłabe)

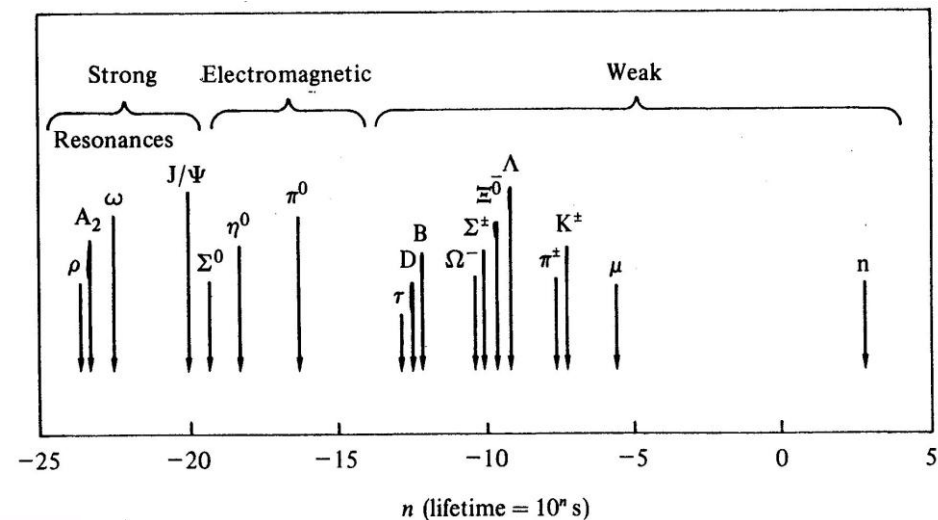


Oddziaływania słabe

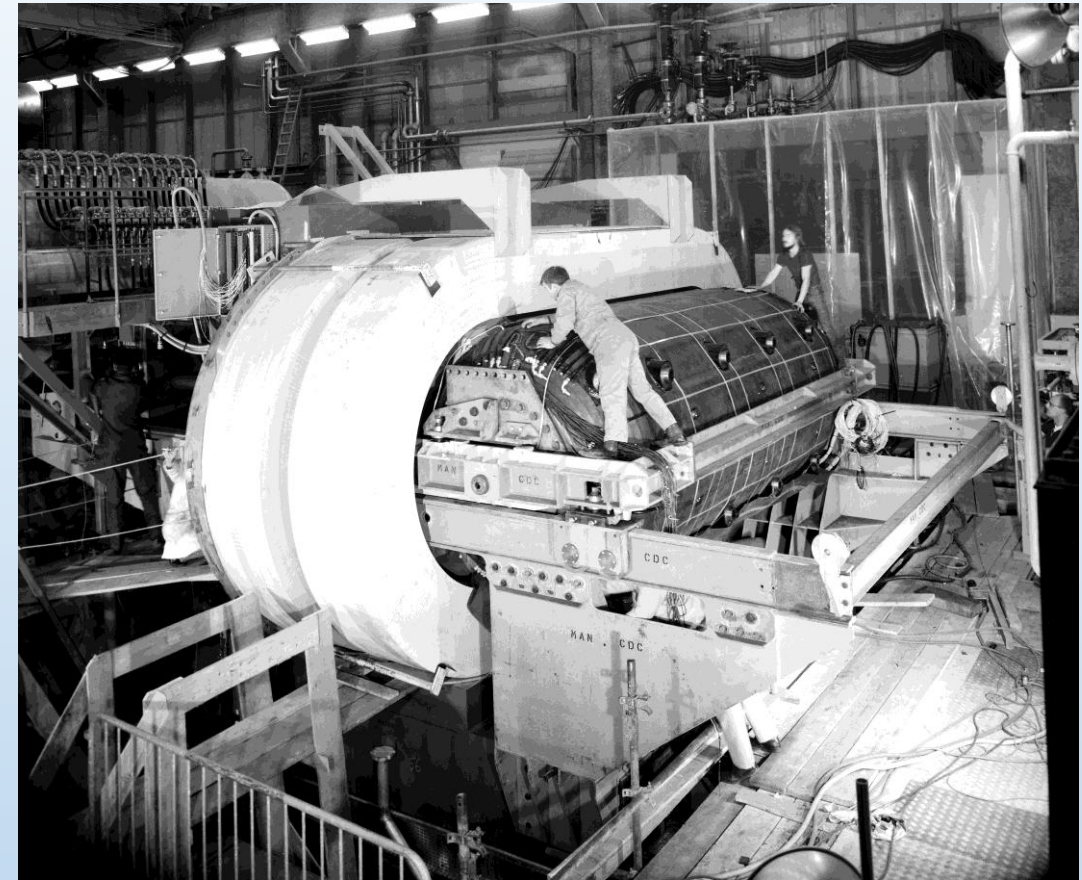
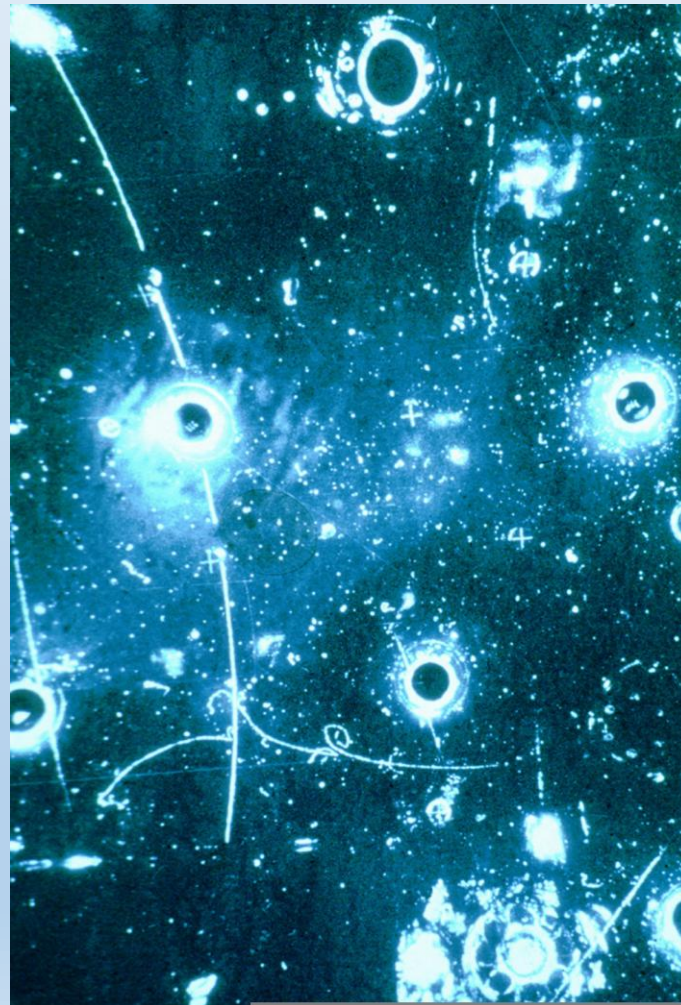
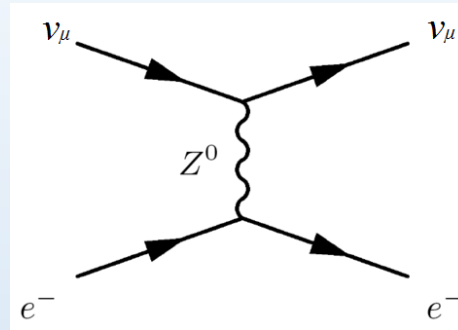
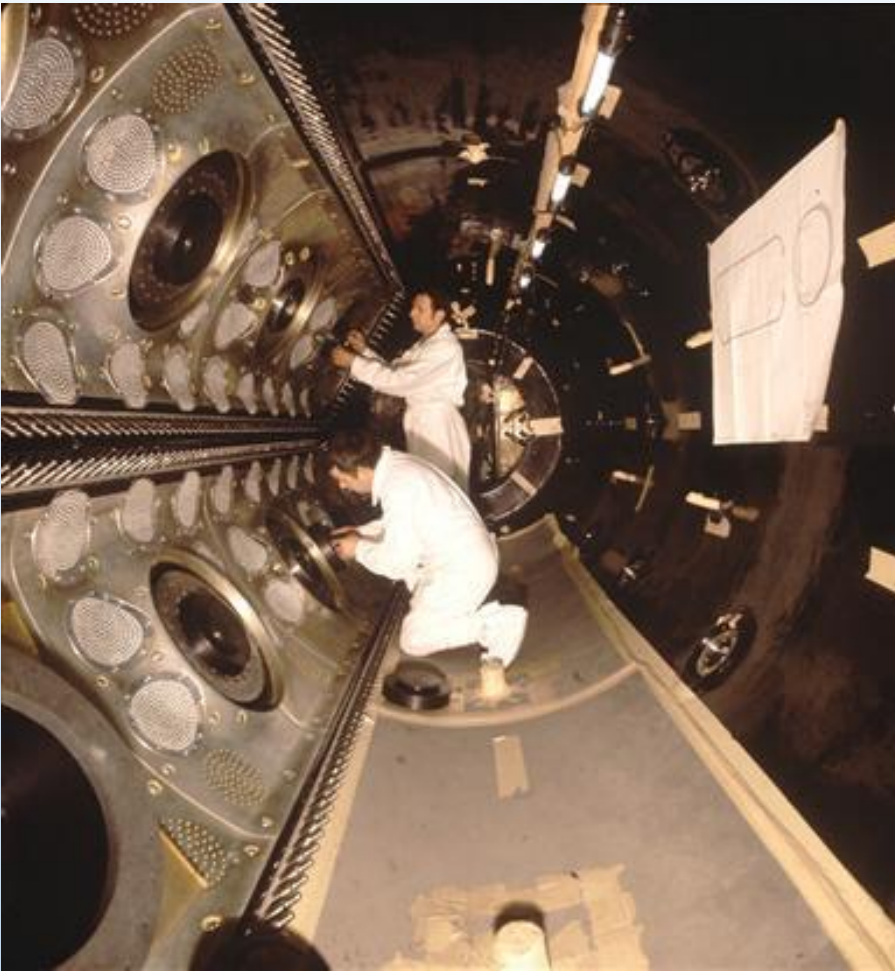
- Oddziaływania słabe są INNE niż elektromagnetyczne i silne:
 - są przenoszone przez ciężkie bozony
 - zmieniają rodzaj cząstki (leptonów i kwarków)
- WSZYSTKIE cząstki (również neutrino) oddziałują słabo



Słabe rozpady są słabe, a więc cząstka żyje stosunkowo długo



Gargamelle bubble chamber, CERN PS 1971-77

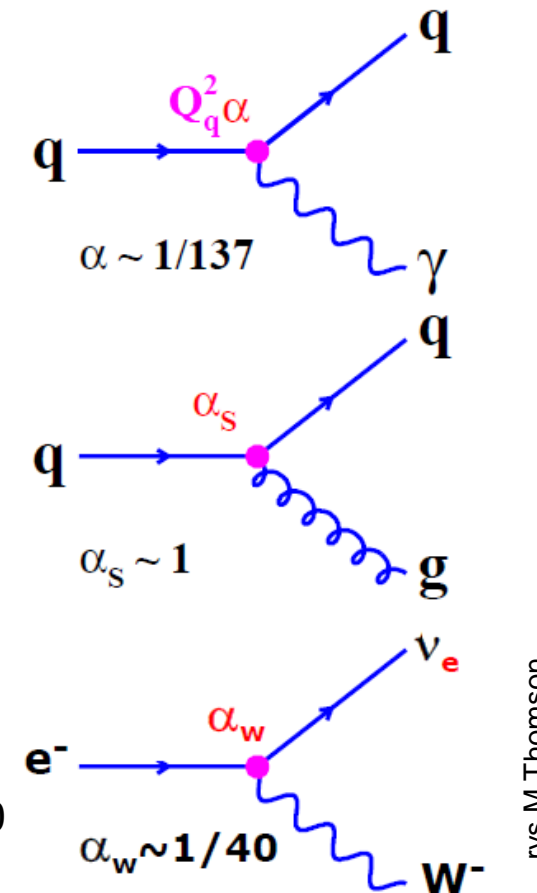


a [leptonic neutral current interaction](#).

A [neutrino](#) interacts with an [electron](#), the track of which is seen horizontally, and emerges as a neutrino without producing a [muon](#). [Wikipedia]

Oddziaływania słabe a silne i elm

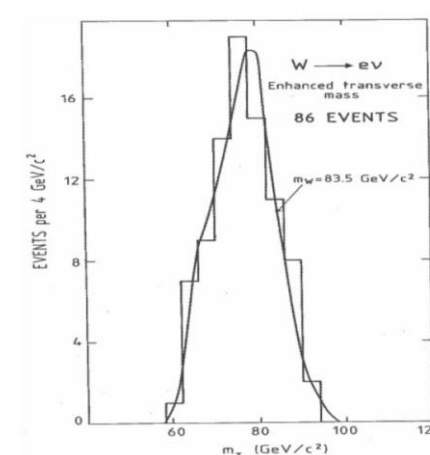
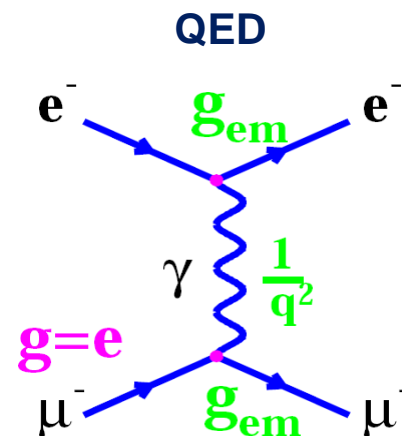
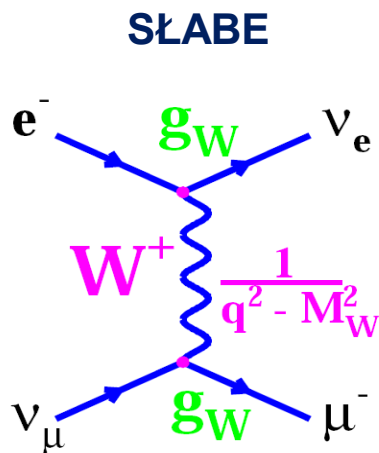
- Oddziaływania elektromagnetyczne:
 - ✓ pomiędzy kwarkami i naładowanymi leptonami
 - ✓ przenoszone przez bezmasowy foton
 - ✓ foton oddziałuje z ładunkiem elektrycznym, $\alpha \approx 1/100$
 - ✓ nie zmieniają rodzaju cząstek
 - ✓ na odległości 10^{-15} m $F_{elm} \approx 200$ N
- Oddziaływania silne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



rys. M. Thomson

które oddziaływania są podobne?

Oddziaływania słabe i elektromagnetyczne



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

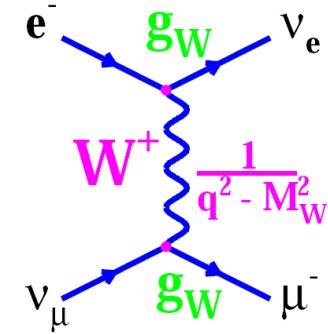
$$M_W = 80.4 \pm 0.1 \text{ GeV}$$

$$Z \approx 0.002 \text{ fm}$$

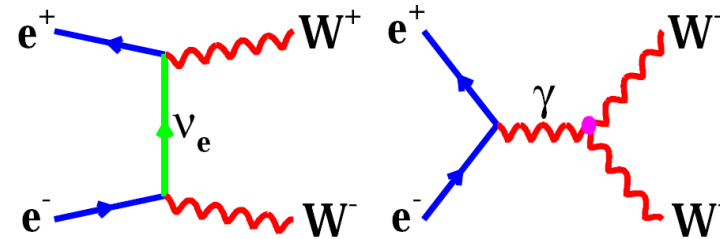
- wymieniany bozon przenosi ładunek elektromagnetyczny,
- oddziaływanie ZMIENIA ZAPACH KWARKA!
- oddziaływanie łamie parzystości

Oddziaływania słabe i trzy bozony

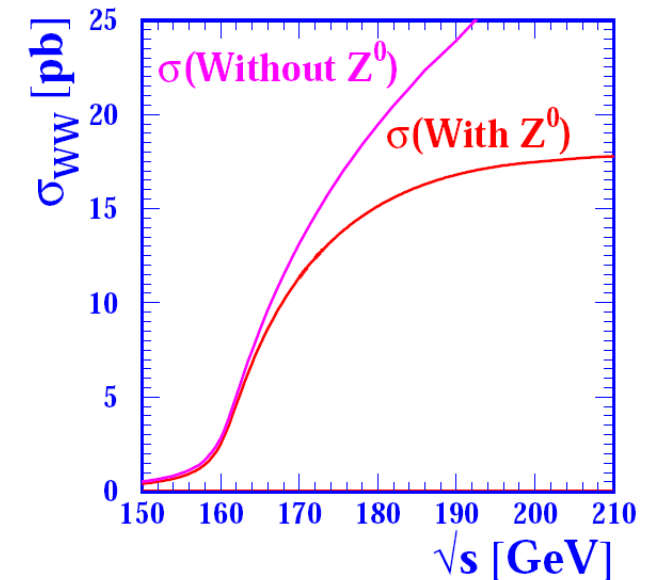
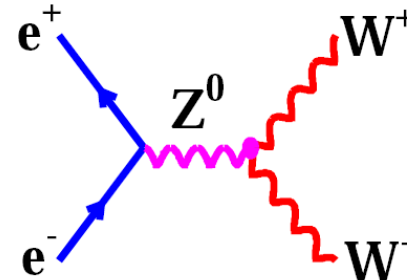
- Przy rozpraszaniu neutrino-elektron wg. teorii Fermiego, przekrój czynny zmierza do nieskończoności.
 - jeśli oddziaływanie zachodzi z wymianą ciężkiego bozonu – propagator powoduje zmniejszenie szybko rosnących równań,
- Przy rozpraszaniu $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ przekrój czynny również miał zbyt 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

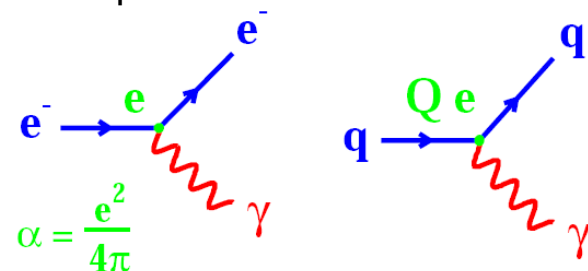


MS- oddziaływania

W ramach MS opisujemy elementarne fermiony ich oddziaływania:

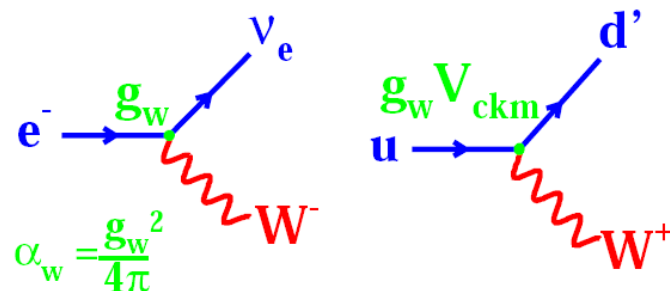
ELEKTROMAGNETYCZNE

rozpraszanie

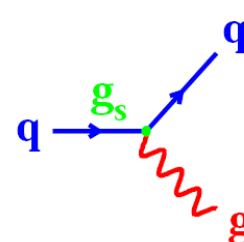


ładunek elektryczny

SŁABE CC (charge current)

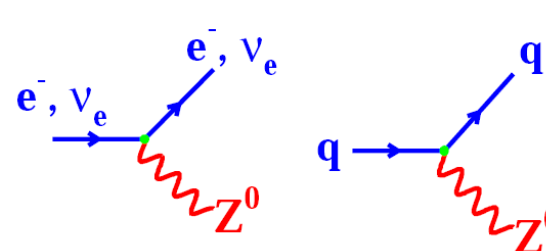


SILNE



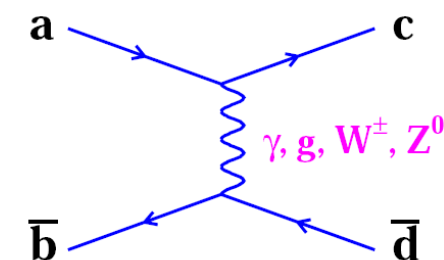
ładunek silny

SŁABE NC (neutral current)

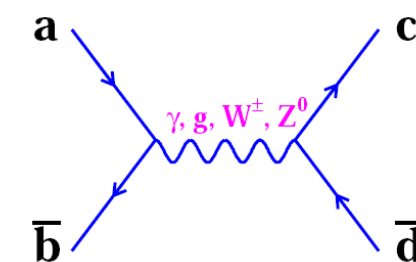


oddz. słabe zmieniają rodzaj kwarków pomiędzy generacjami !

rozpraszanie



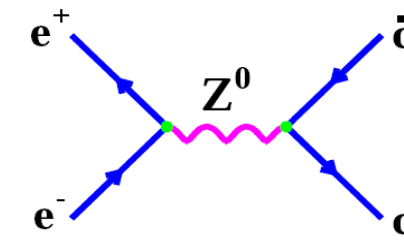
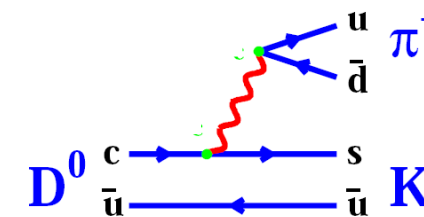
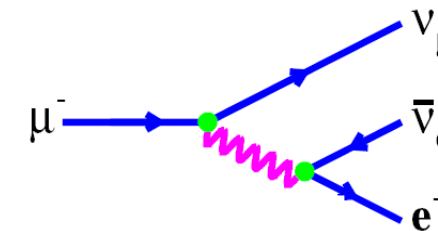
anihilacja



Oddziaływania słabe

- Procesy słabe można 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: $\Lambda \rightarrow p \pi^-$
 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$
 $B^0 \rightarrow K^- \pi^+$



- Procesy słabe zachodzą poprzez wymianę:
 - bozonu pośredniczącego W^\pm (prądy naładowane)
 - bozonu pośredniczącego Z^0 (prądy neutralne)

Zajmiemy się tu prądami naładowanymi:

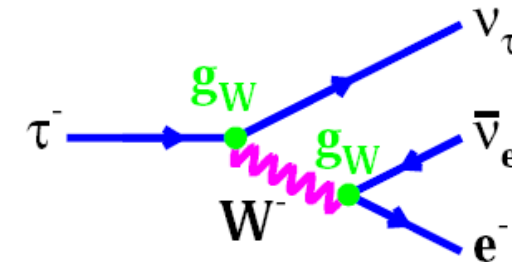
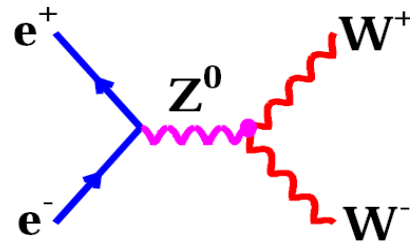
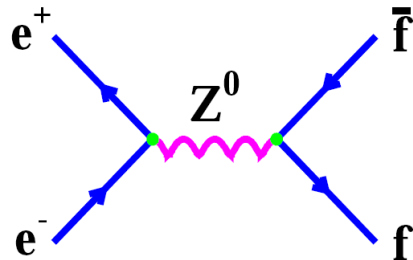
Oddziaływania słabe i elektromagnetyczne

- 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**.

$$\alpha_s \approx 0.2$$

$$\alpha_W \approx 0.03$$

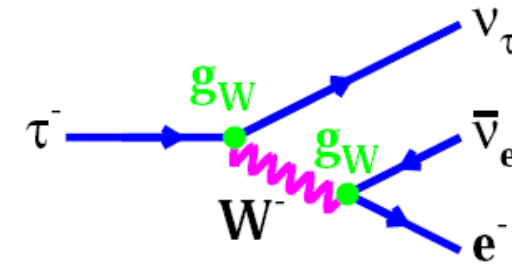
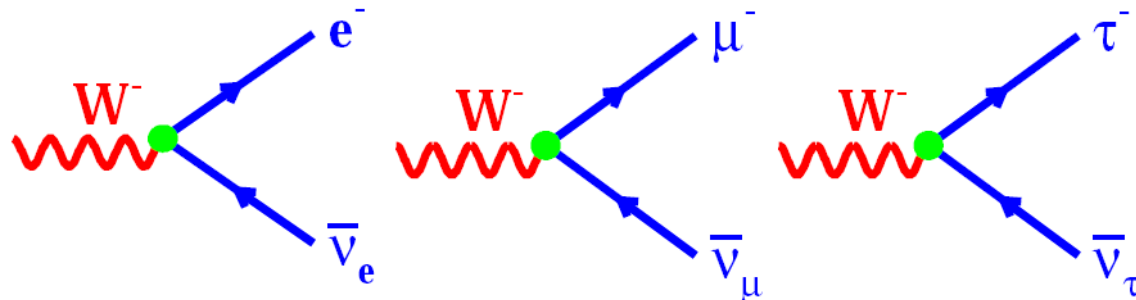
$$\alpha_{elm} \approx 0.01$$



Słabe rozpady leptonów

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

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

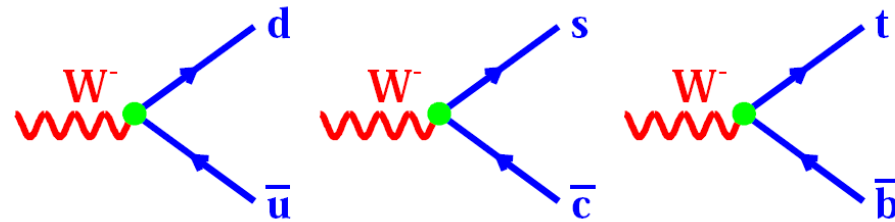


BRAK: $W \rightarrow e^- \nu_\mu$

nie ma oddziaływań pomiędzy leptonami z różnych pokoleń !!!

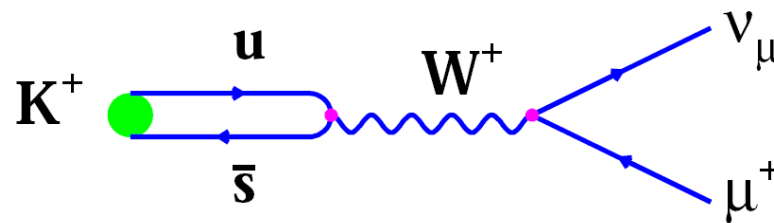
Słabe rozpady kwarków

- 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!**

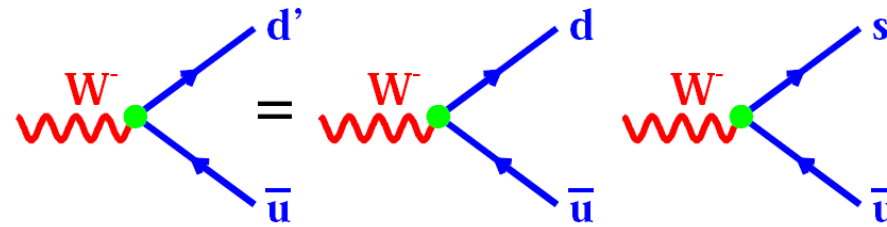


- Oznacza to, że słabe rozpady kwarków wyglądają trochę inaczej, bo mogą zachodzić ze zmianą pokolenia

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

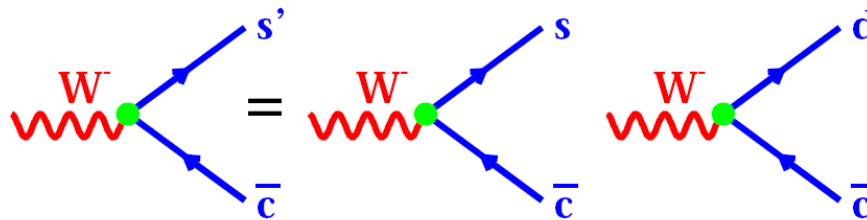
stany masowe (silne, o określonym zapachu, flavorze)

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

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

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

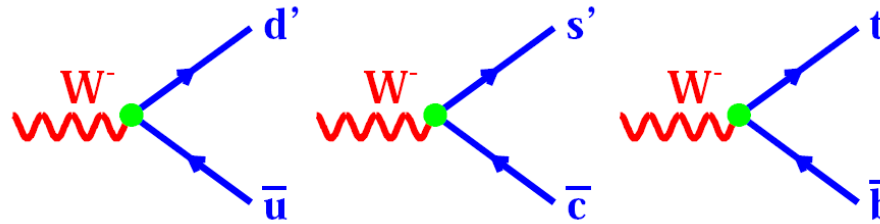
kąt mieszania (kąt Cabbibo)



$$\theta_c = 13^\circ$$

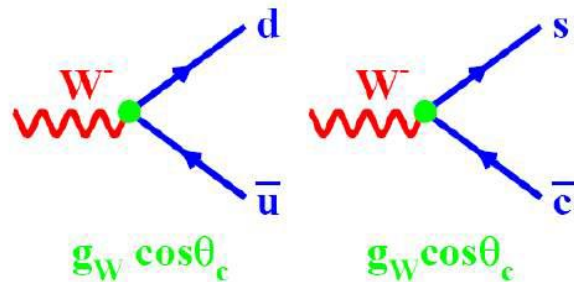
Mieszanie w trzech rodzinach kwarków

- Uogólnienie na trzy rodziny kwarków:

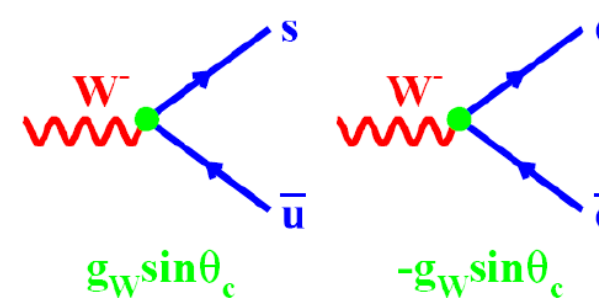


$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

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



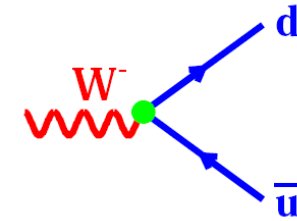
$$|M|^2 \propto \cos^2 \theta_C$$



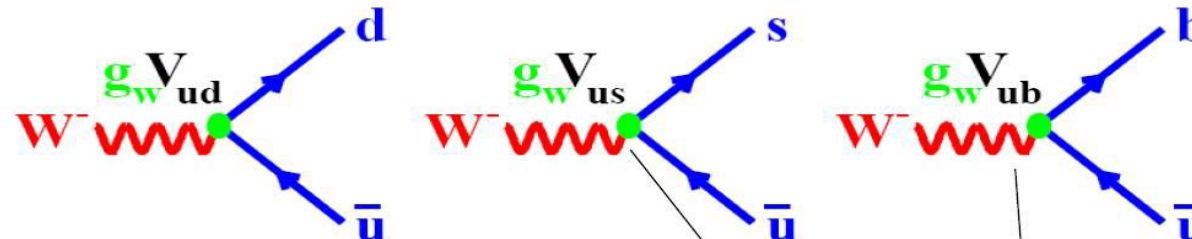
$$|M|^2 \propto \sin^2 \theta_C$$

Mieszanie w trzech rodzinach kwarków

- Kwark d dla oddziaływań słabych „widziany jest” jako d' , czyli mieszanina d, s , i b :



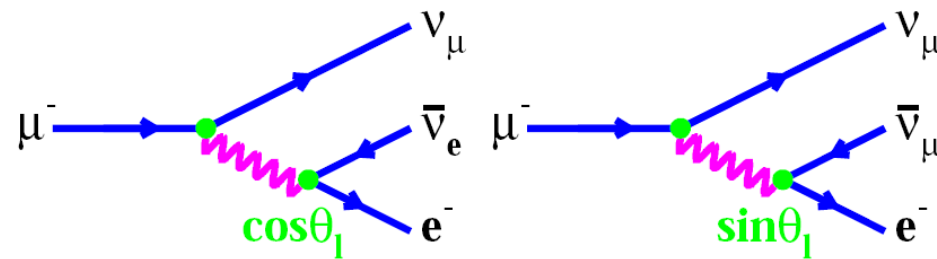
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$



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

Mieszanie w trzech rodzinach leptonów?

- Jak by wyglądało mieszanie pomiędzy generacjami leptonów?



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

MS – podejźmy teraz formalnie do oddziaływań słabych:

Procesy słabe i mieszanie Cabbibo

- Kąt mieszania (kąt Cabbibo) jest jednym z parametrów MS, który musi zostać zmierzony, nie wynika z teorii

$$\frac{\left| \begin{array}{c} s \rightarrow W^- \rightarrow u \\ d \rightarrow W^- \rightarrow u \end{array} \right|^2}{\left| \begin{array}{c} s \rightarrow W^- \rightarrow d \\ d \rightarrow W^- \rightarrow d \end{array} \right|^2} = \tan^2 \theta_c$$

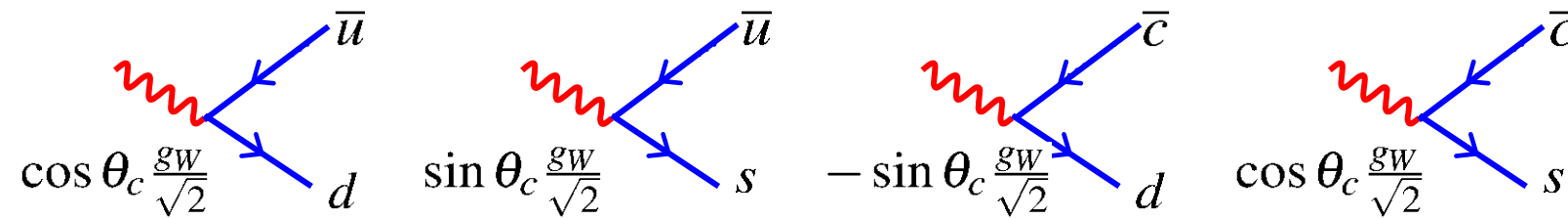
$$\frac{\Gamma(K^+ \rightarrow \mu \nu_\mu)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu \nu_\mu)} \sim \tan^2(\theta_c)$$

- FCCC (Flavour Changing Charge Currents) mogą teraz sprzęgać się z różną siłą do różnych generacji kwarków!

$$\begin{array}{c} \bar{u} \\ \swarrow \text{red wavy} \\ \searrow \text{blue} \\ \frac{g_W}{\sqrt{2}} \end{array} \begin{array}{c} d' \\ \swarrow \text{blue} \\ \searrow \text{red wavy} \end{array} \equiv \cos \theta_c \begin{array}{c} \bar{u} \\ \swarrow \text{red wavy} \\ \searrow \text{blue} \\ \frac{g_W}{\sqrt{2}} \end{array} \begin{array}{c} d \\ \swarrow \text{blue} \\ \searrow \text{red wavy} \end{array} + \sin \theta_c \begin{array}{c} \bar{u} \\ \swarrow \text{red wavy} \\ \searrow \text{blue} \\ \frac{g_W}{\sqrt{2}} \end{array} \begin{array}{c} s \\ \swarrow \text{blue} \\ \searrow \text{red wavy} \end{array}$$

Mieszanie kwarków z czarmem

- Teoria elektroslaba – model Glashow-Weinberg-Salam (GIM), m.in. opisuje mieszanie z kwarkiem c:



Dla dwóch generacji kwarków mieszanie opisane jest przez pojedynczy, rzeczywisty parametr – brak łamania parzystości CP.

Mieszanie trzech generacji kwarków

- Idea: kwarki „dolne” w rozpadach słabych uczestniczą jako mieszane stany masowe (taka konwencja, mogły też mieszać się kwarki „górne”):

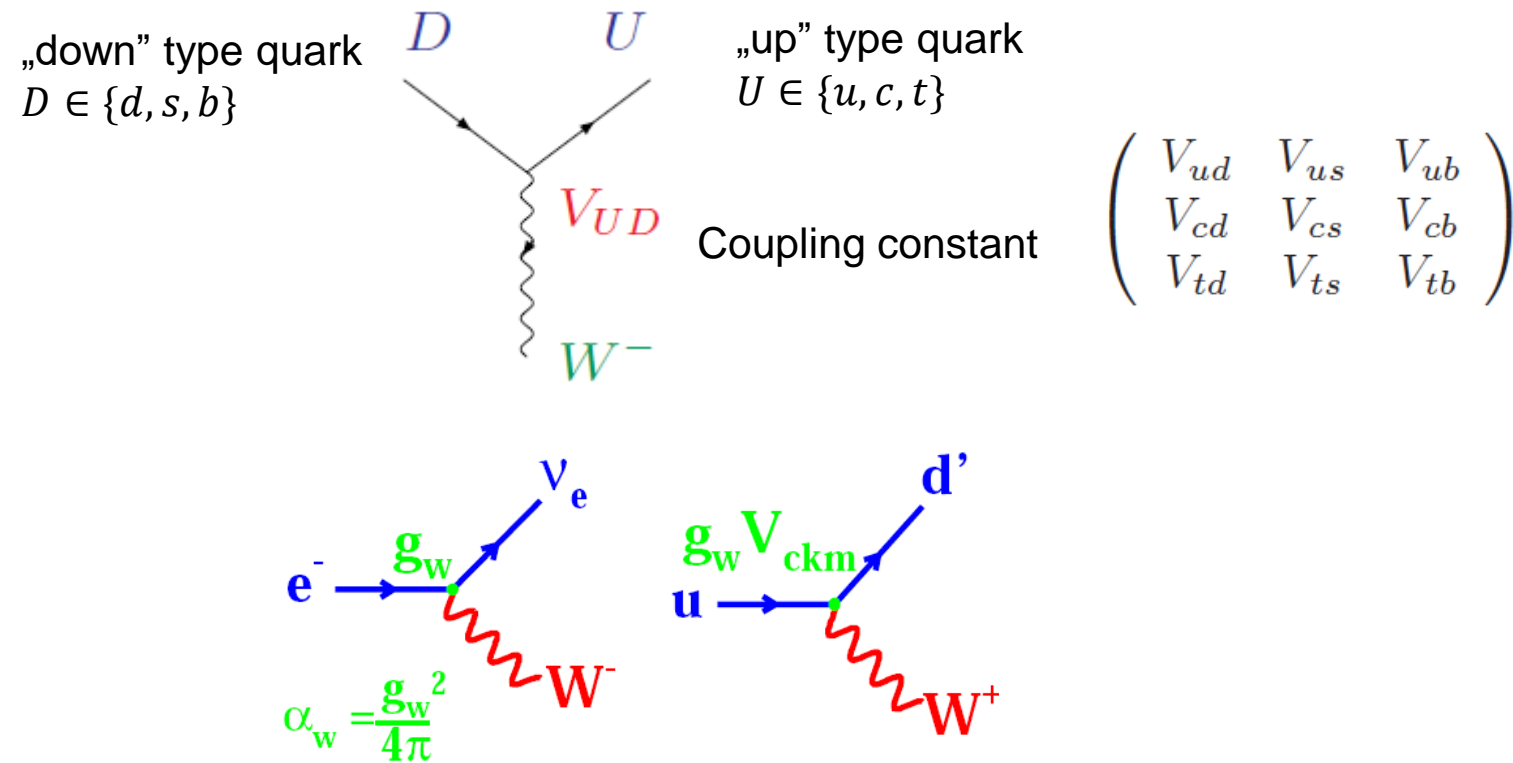
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Stany (własne) słabe Macierz mieszania Cabbibo-Cobayashi-Maskawa Masowe e-stany

- Elementy V_{ij} macierzy CKM są liczbami zespolonymi.
- Macierz CKM jest UNITARNA (zachowanie prawdopodobieństwa)
- Elementów macierzy CKM nie można wyznaczyć z teorii – muszą być ZMIERZONE.

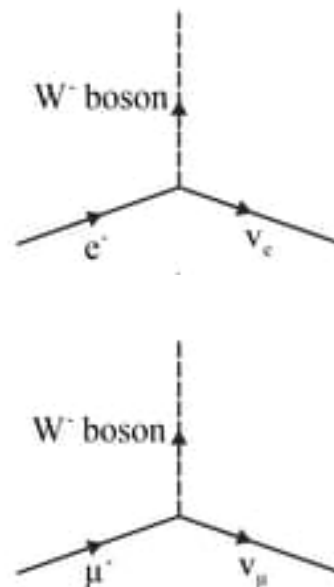
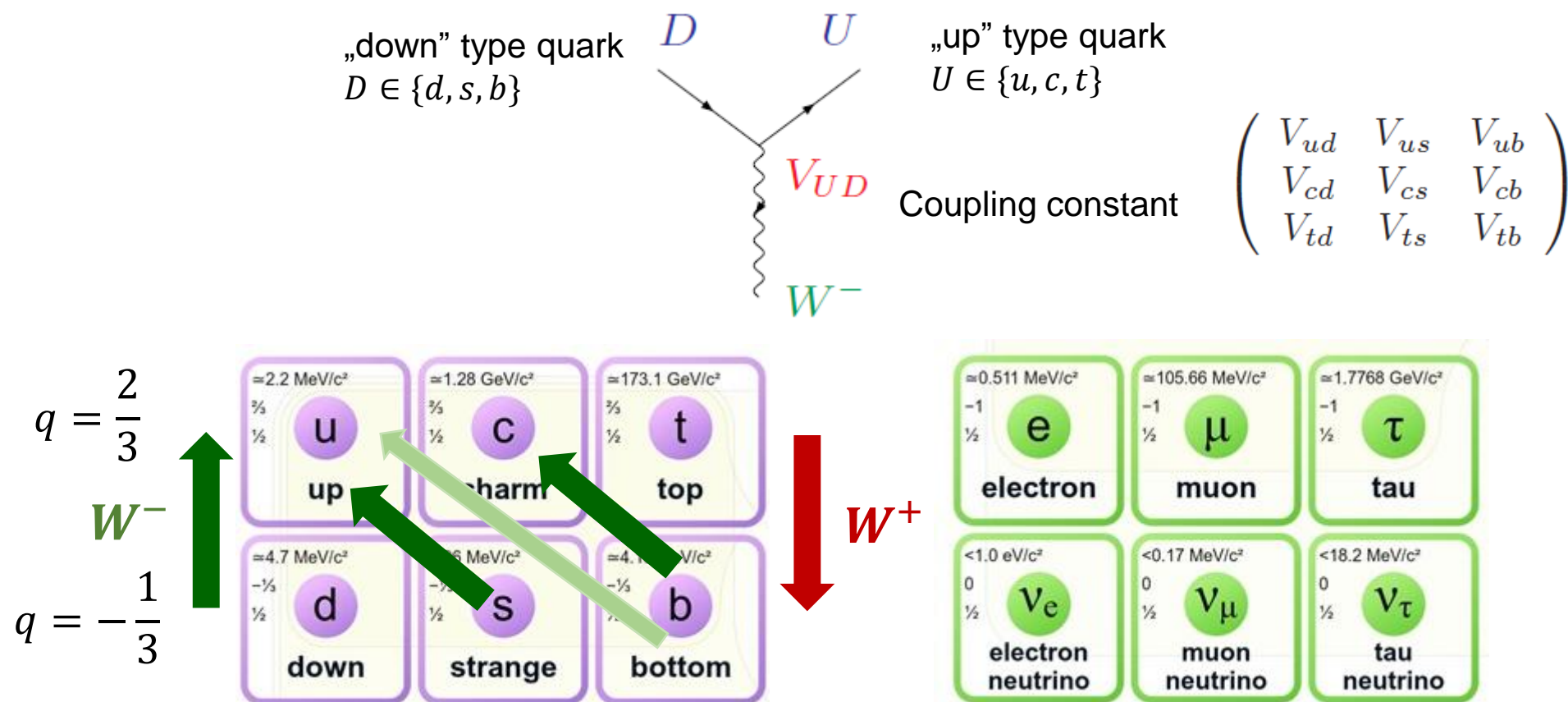
„Słaby” wierzchołek

- Idea: kwarki „dolne” w rozpadach słabych uczestniczą jako mieszane stany masowe (taka konwencja, mogły też mieszać się kwarki „górne”):



„Słaby” wierzchołek

- Idea: kwarki „dolne” w rozpadach słabych uczestniczą jako mieszane stany masowe (taka konwencja, mogły też mieszać się kwarki „górne”):



Macierz CKM

- Elementów macierzy CKM nie można wyznaczyć z teorii – muszą być ZMIERZONE.

Cabibbo matrix

$$\begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.974 & 0.226 & 0.004 \\ 0.23 & 0.96 & 0.04 \\ 0.01 & 0.04 & 0.999 \end{pmatrix}$$

- „Standardowa” parametryzacja macierzy CKM:

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$$c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$$

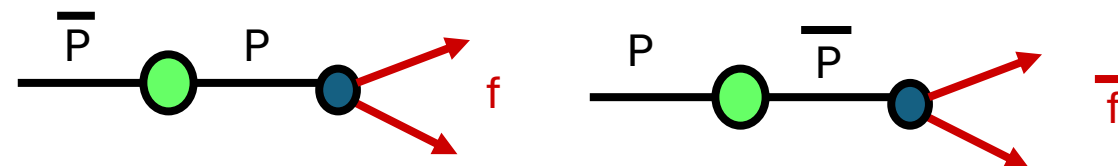
δ – nieredukowalna faza, ona odpowiada za CPV

Trzy typy łamania parzystości CP

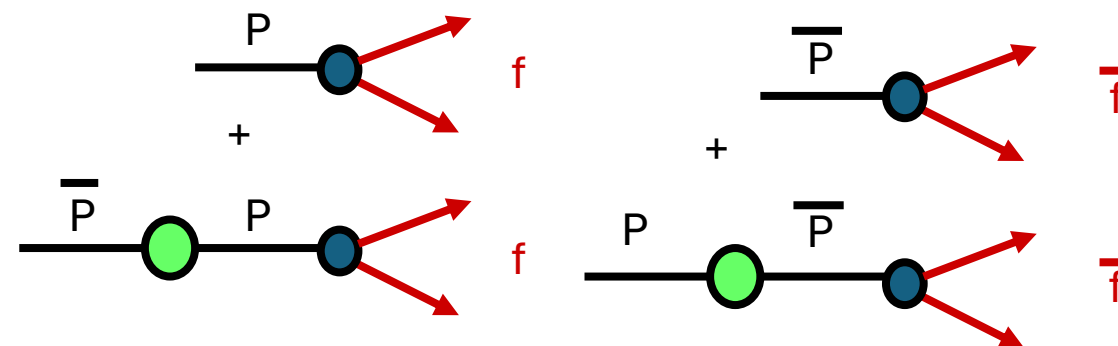
I. CP violation in decay (direct CP Violation)



II. CP violation in mixing (indirect CP Violation)



III. CP violation in interference between mixing and decay



Jak znaleźć CPV?

- Obserwacja \mathcal{CP} polega na porównaniu szybkości rozpadu (decay rate, czyli liczby rozpadów na czas) $\Gamma(P \rightarrow f)$ z $\Gamma(\bar{P} \rightarrow \bar{f})$
- Jest to pośrednie łamanie \mathcal{CP} w mieszaniu neutralnych mezonów
- Definiujemy asymetrię pomiędzy rozpadami neutralnych stanów \mathcal{CP} sprzężonych:

$$A_{CP}(t) = \frac{\Gamma\{B(t) \rightarrow f\} - \Gamma\{\bar{B}(t) \rightarrow \bar{f}\}}{\Gamma\{B(t) \rightarrow f\} + \Gamma\{\bar{B}(t) \rightarrow \bar{f}\}}$$

gdzie: $\Gamma(P \rightarrow f) \propto |A_f|^2$

- Amplituda A_f jest zdefiniowana jako element macierzowy, który opisuje przejście pomiędzy stanem P i f , takim, że:

$P \rightarrow f$ opisywane jest przez $A_f = \langle f | H | P \rangle$

$\bar{P} \rightarrow \bar{f}$ przez: $\bar{A}_f = \langle \bar{f} | H | \bar{P} \rangle$