Rozdział 3

Model kwarkowo-partonowy oddziaływań cząstek
Diagramy kwarkowe (*quark line diagrams*)
Kąt Cabibbo, mechanizm GIM, macierz Kobayashi-Maskawy (CKM)

QED	QCD
elektron	N_f trypletów kwarków
ładunek elektryczny	ładunek kolorowy
foton	oktet gluonów (bezmasowych bozonów wektorowych)
pozytonium	kwarkonia

Ładunek kolorowy, podobnie jak ładunek elektryczny, nie może zostać zniszczony, ale stany fizyczne w QCD (hadrony) muszą być bezkolorowe („białe”)

Cząstki naładowane elektrycznie w atomach

Cząsteczki = neutralne układy ładunków elektrycznych

Oddziaływania elektromagnetyczne
Potencjał kulombowski

Potencjał Lennarda-Jonesa

Siły Van der Waalsa

Kwarki naładowane kolorowo w hadronach

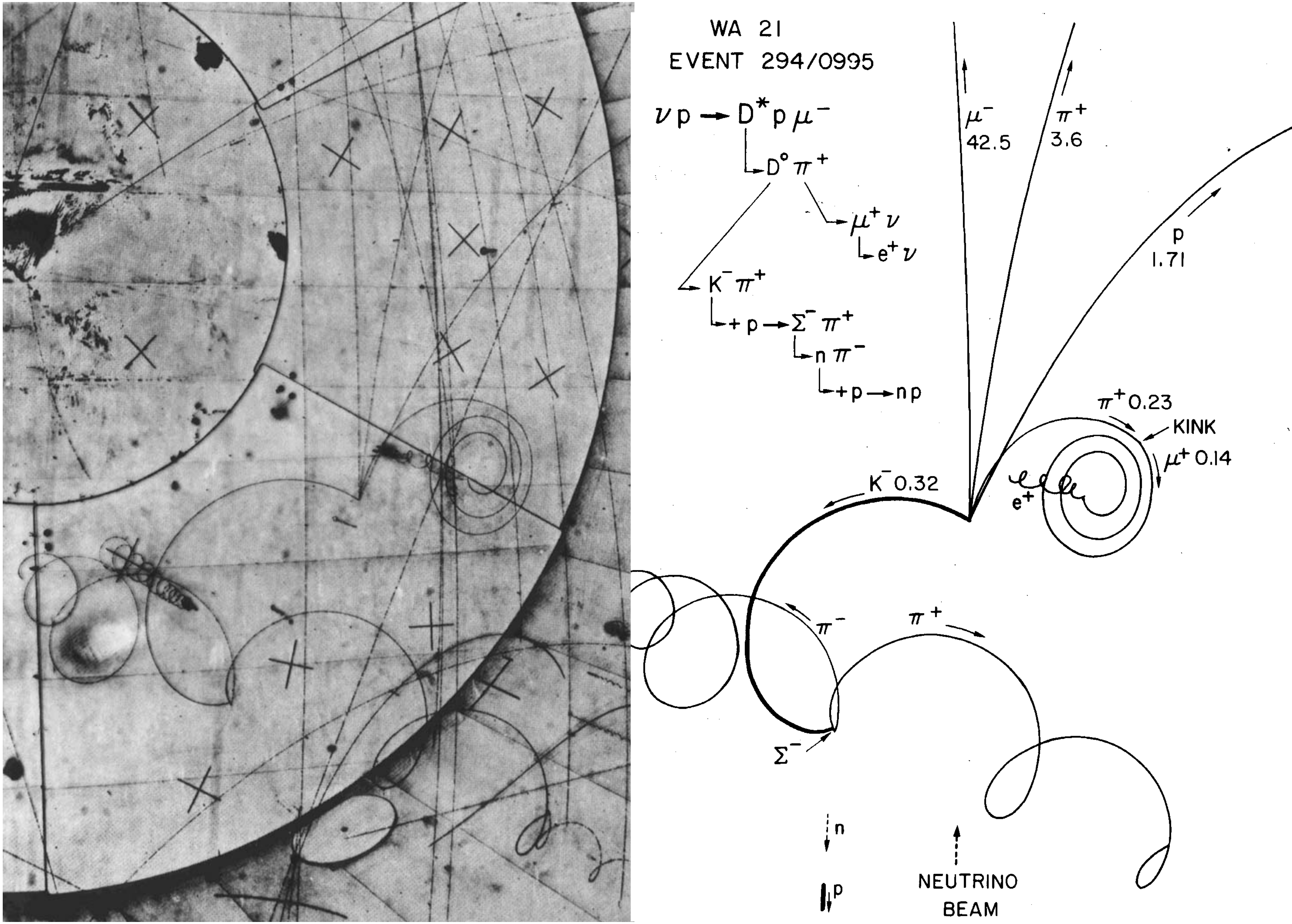
Hadrony = neutralne („białe”) układy ładunków kolorowych

Oddziaływania chromodynamiczne

Potencjał kolorowy

Potencjał Yukawy

„Siły Van der Waalsa”



WA 21
EVENT 294/0995
$\nu p \rightarrow D^* p \mu^-$
$\llcorner \rightarrow D^0 \pi^+$
$\llcorner \rightarrow \mu^+ \nu$
$\llcorner \rightarrow e^+ \nu$
$\llcorner \rightarrow K^- \pi^+$
$\llcorner \rightarrow + p \rightarrow \Sigma^- \pi^+$
$\llcorner \rightarrow n \pi^-$
$\llcorner \rightarrow + p \rightarrow n p$
μ^- 42.5
π^+ 3.6
p 1.71
π^+ 0.23
KINK
μ^+ 0.14
e^+
K^- 0.32
π^-
π^+
Σ^-
n
p
NEUTRINO BEAM

$$\nu + p \longrightarrow \mu^- + D^{*+} + p$$

$$\searrow D^0 + \pi^+$$

$$\searrow K^- + \pi^+$$

$$\searrow \mu^+ + \nu$$

$$\searrow e^+ + \nu$$

$$K^- + p \longrightarrow \Sigma^- + \pi^+$$

$$\searrow n + \pi^-$$

$$\nu + (uud) \longrightarrow \mu^- + (c\bar{d}) + (uud)$$

$$\searrow (c\bar{u}) + (u\bar{d})$$

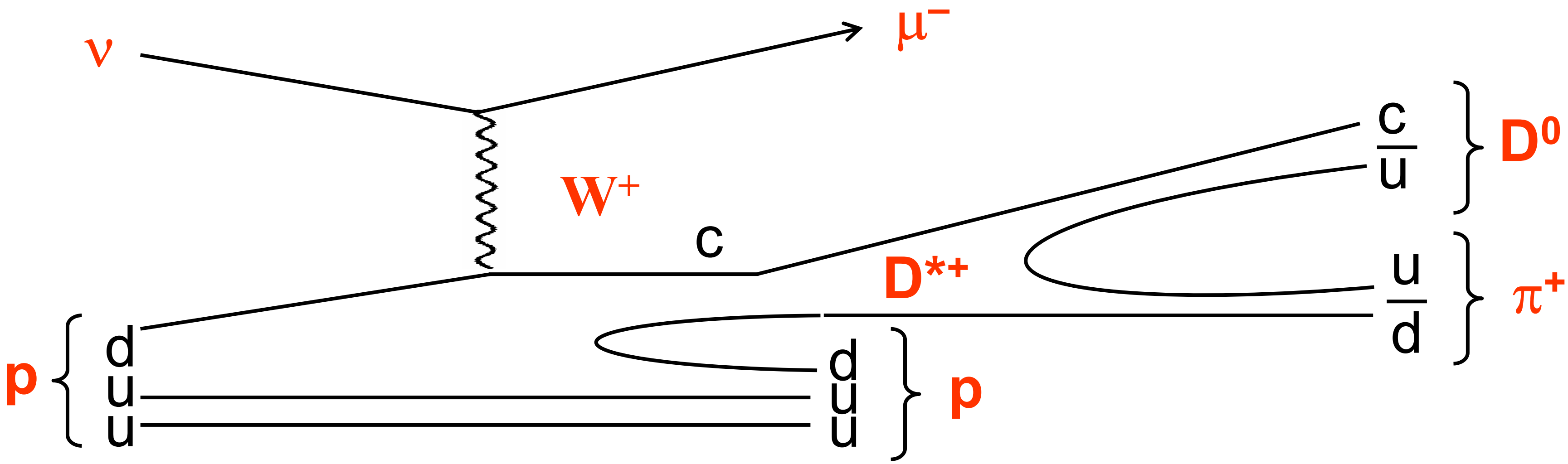
$$\searrow (s\bar{u}) + (u\bar{d})$$

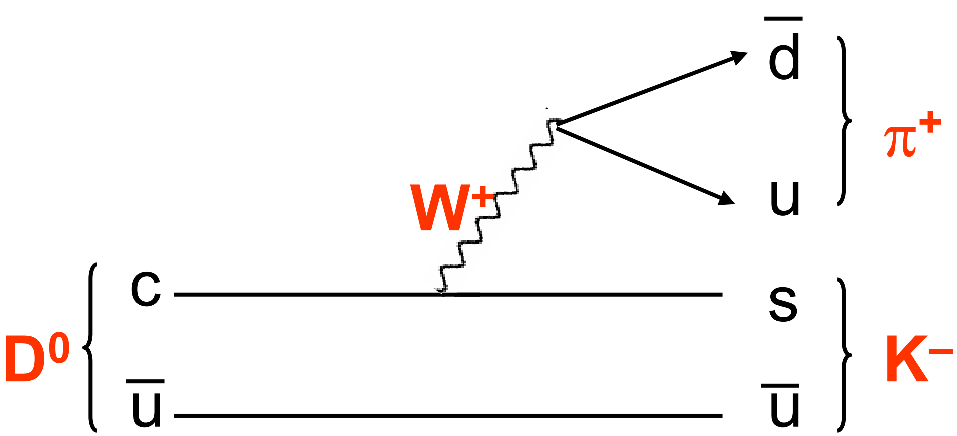
$$\searrow \mu^+ + \nu$$

$$\searrow e^+ + \nu$$

$$(s\bar{u}) + (uud) \longrightarrow (sdd) + (u\bar{d})$$

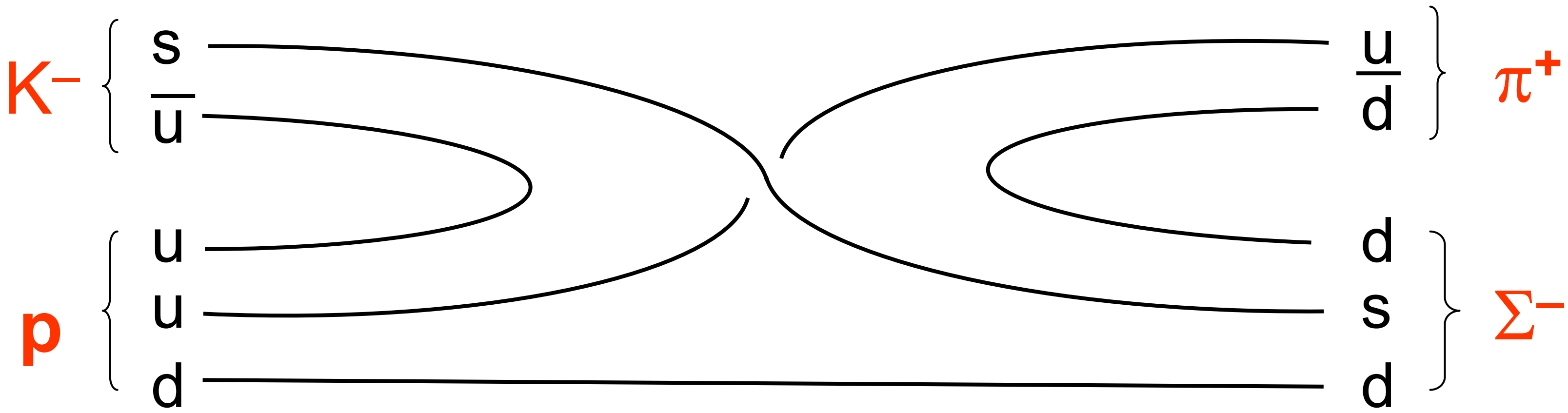
$$\searrow (udd) + (\bar{u}d)$$

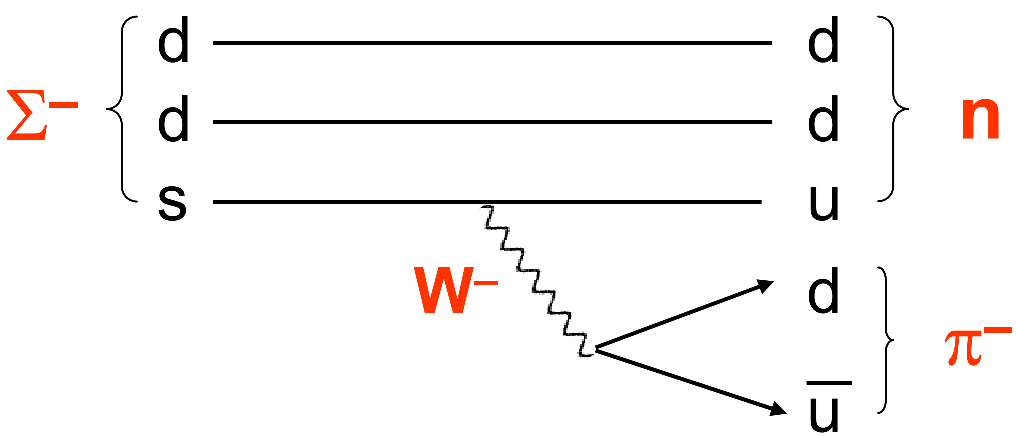


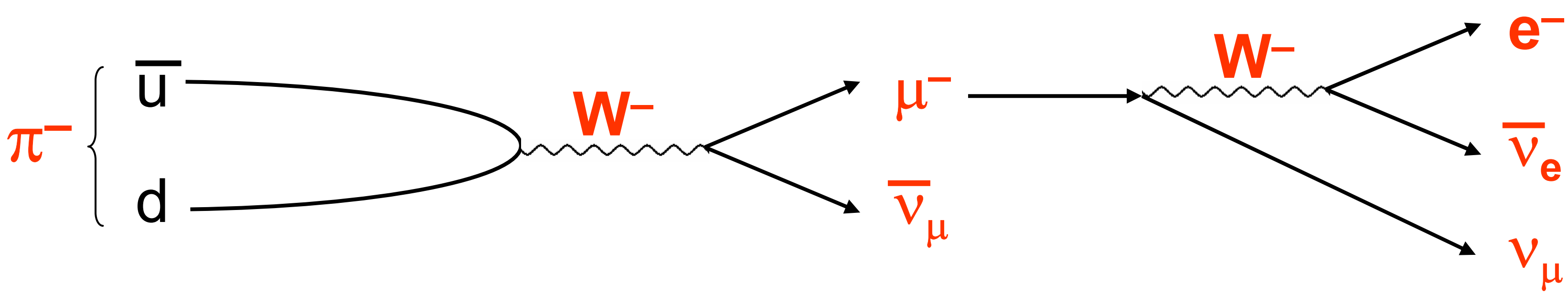


d ⟶ c „Cabibbo suppressed”

c ⟶ s „Cabibbo favoured”


K^-
s
$\bar{u}$
p
u
u
d
u
$\bar{d}$
π^+
d
s
d
Σ^-


Σ^-
d
d
s
d
d
u
n
W^-
d
$\bar{u}$
π^-


π^-
$\bar{u}$
d
W^-
μ^-
$\bar{\nu}_\mu$
W^-
e^-
$\bar{\nu}_e$
ν_μ

Oktet kolorowych gluonów

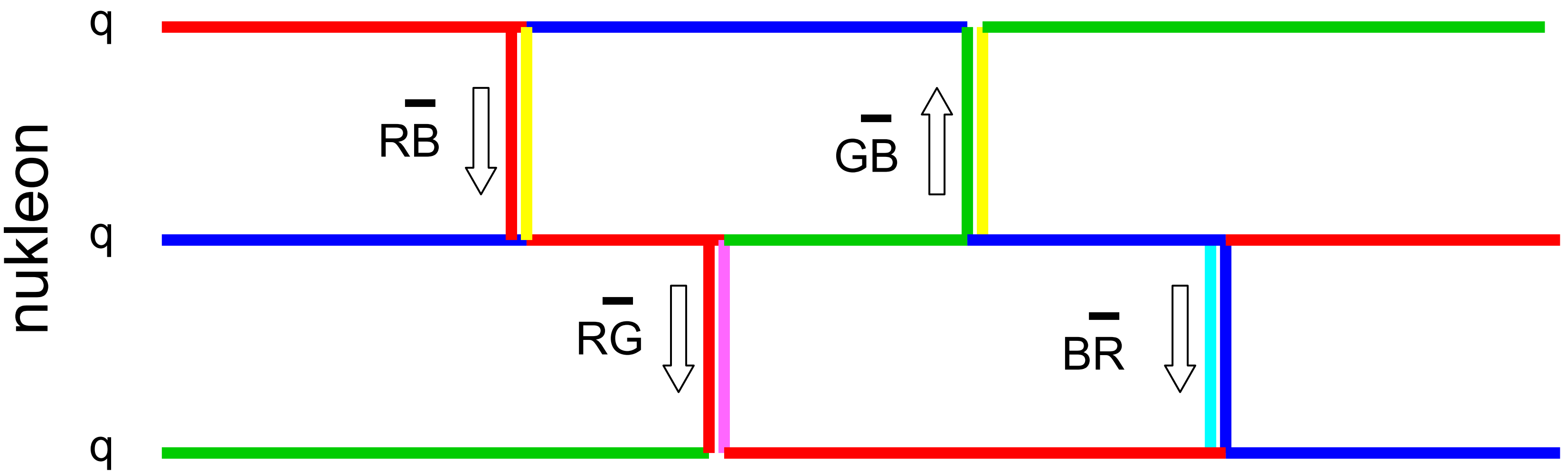
	B	R	G
$\bar{B}$	$\bar{B}B$	$\bar{B}R$	$\bar{B}G$
$\bar{R}$	$\bar{R}B$	$\bar{R}R$	$\bar{R}G$
$\bar{G}$	$\bar{G}B$	$\bar{G}R$	$\bar{G}G$

z SU(3): 3 x 3 kombinacje kolorowe $\longrightarrow$ oktet i singlet

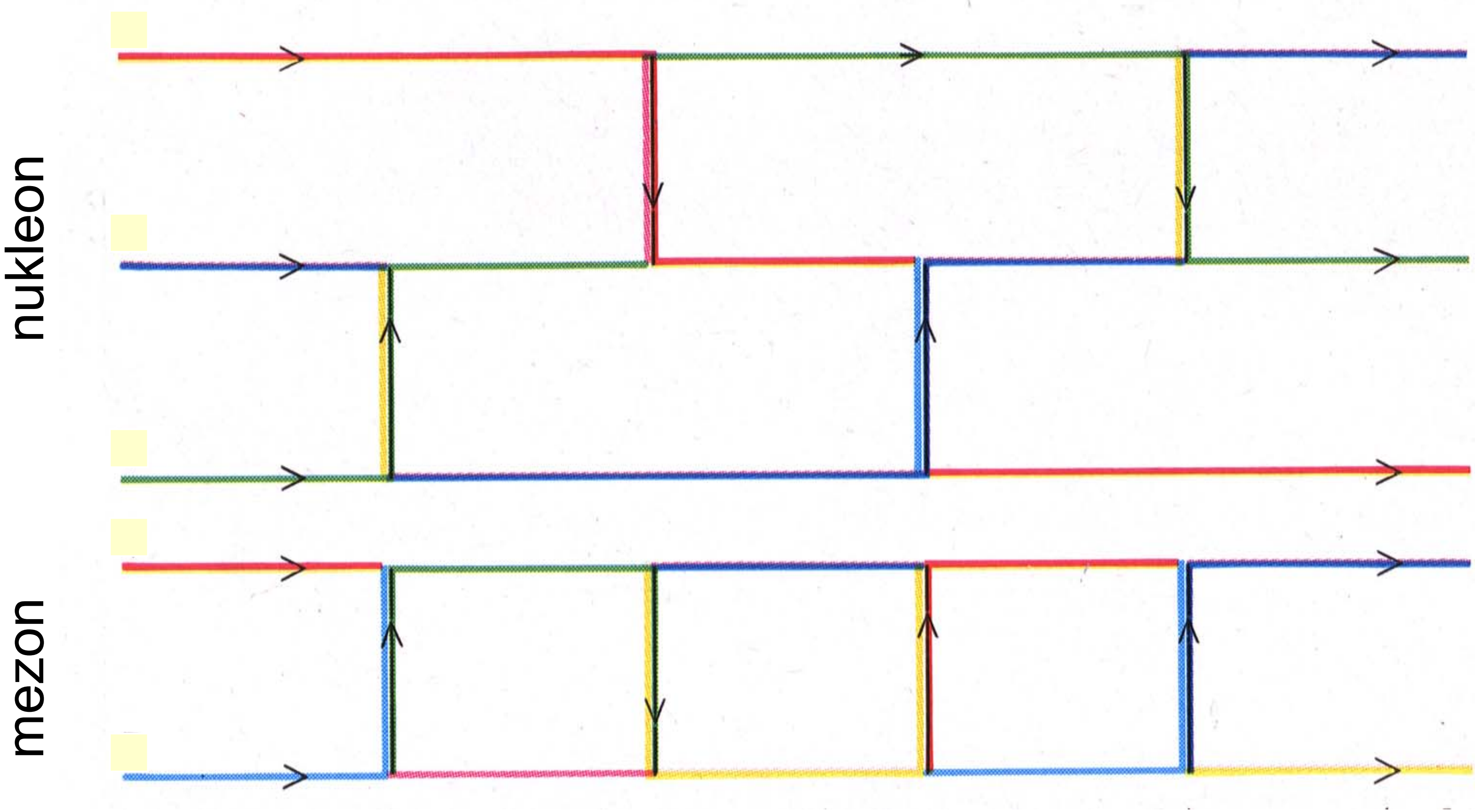
$$3 \otimes 3 = 8 \oplus 1$$

oktet gluonów $\bar{B}R$, $\bar{B}G$, $\bar{R}B$, $\bar{R}G$, $\bar{G}B$, $\bar{G}R$,
oraz $(1/\sqrt{2})(R\bar{R} - G\bar{G})$, $(1/\sqrt{6})(R\bar{R} + G\bar{G} - 2B\bar{B})$

[singlet $(1/\sqrt{3})(R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B})$ nie niesie koloru]

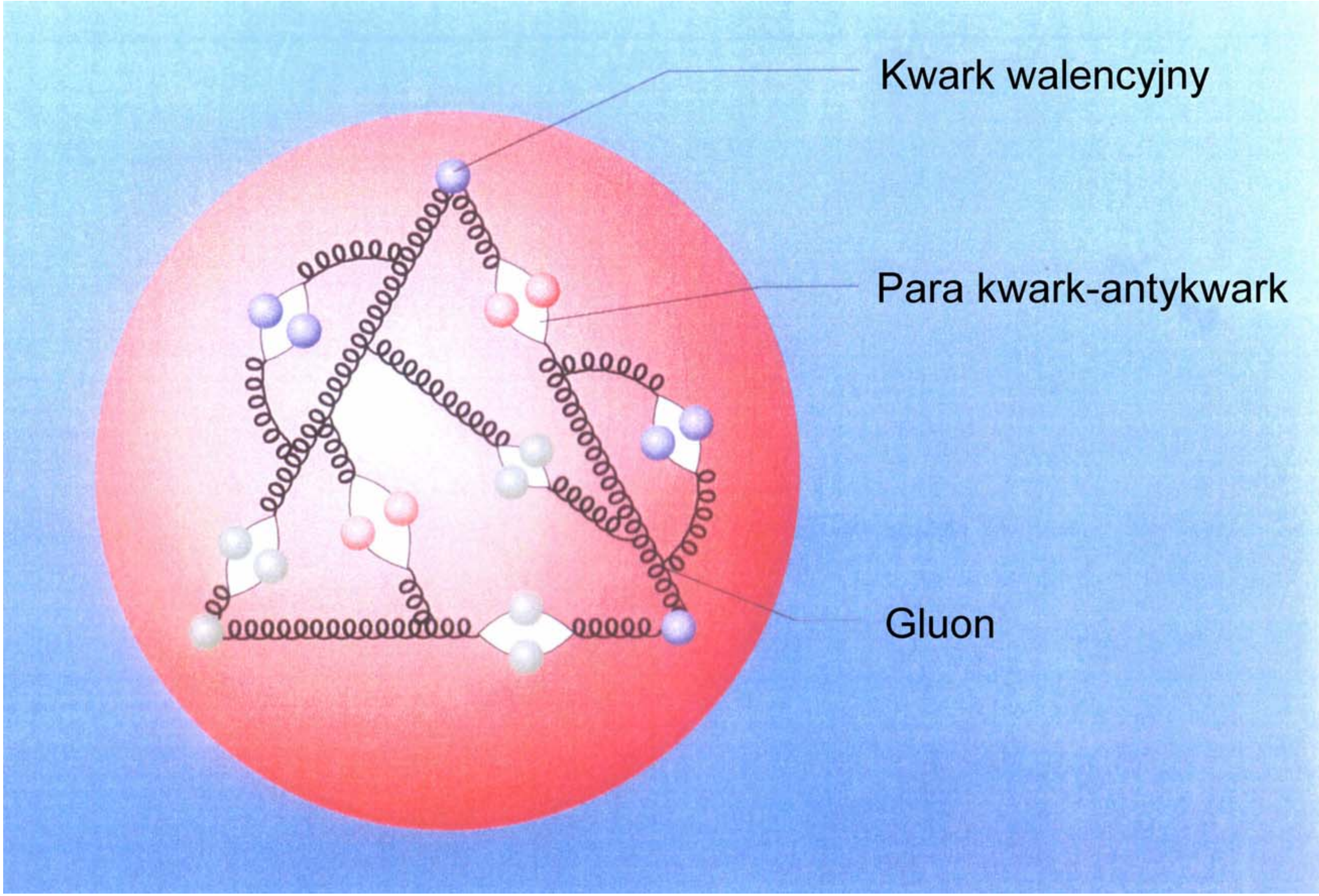


obraz bardzo uproszczony!



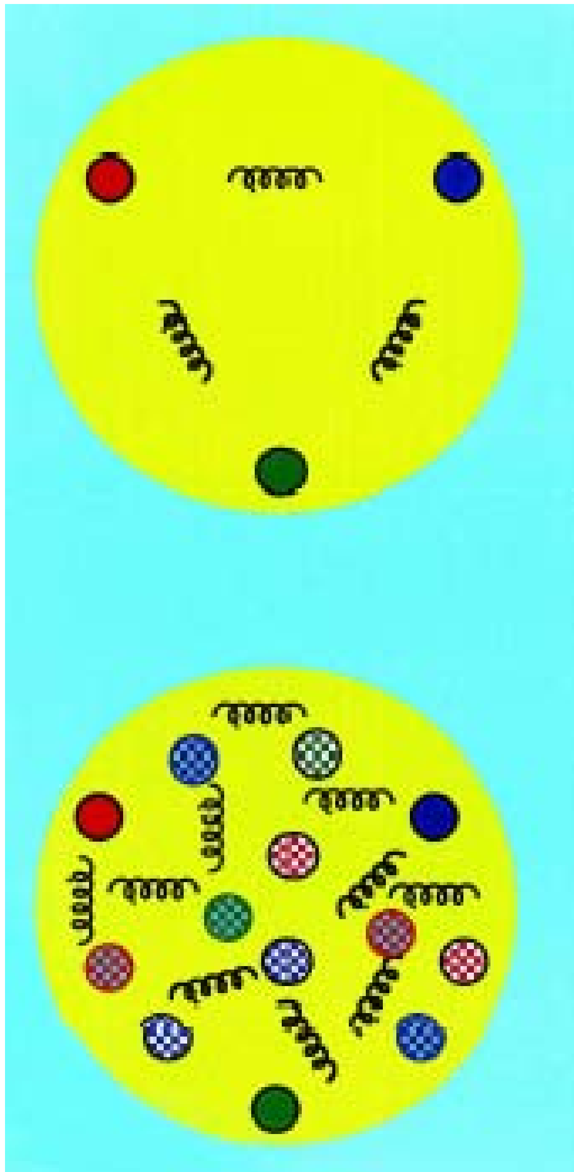
obraz bardzo uproszczony!

„Prawdziwy” obraz nukleonu

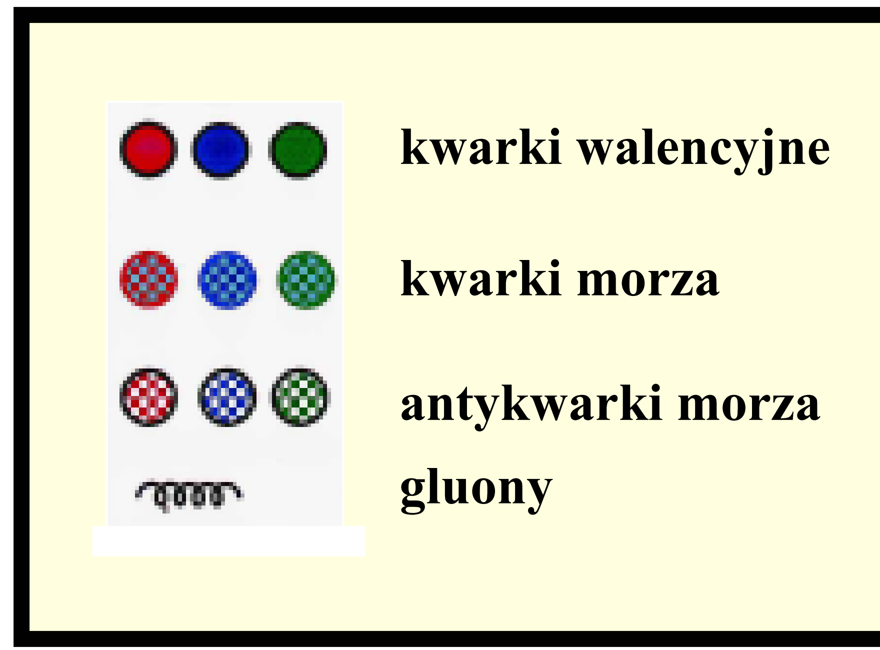


Struktura protonu przy różnych energiach

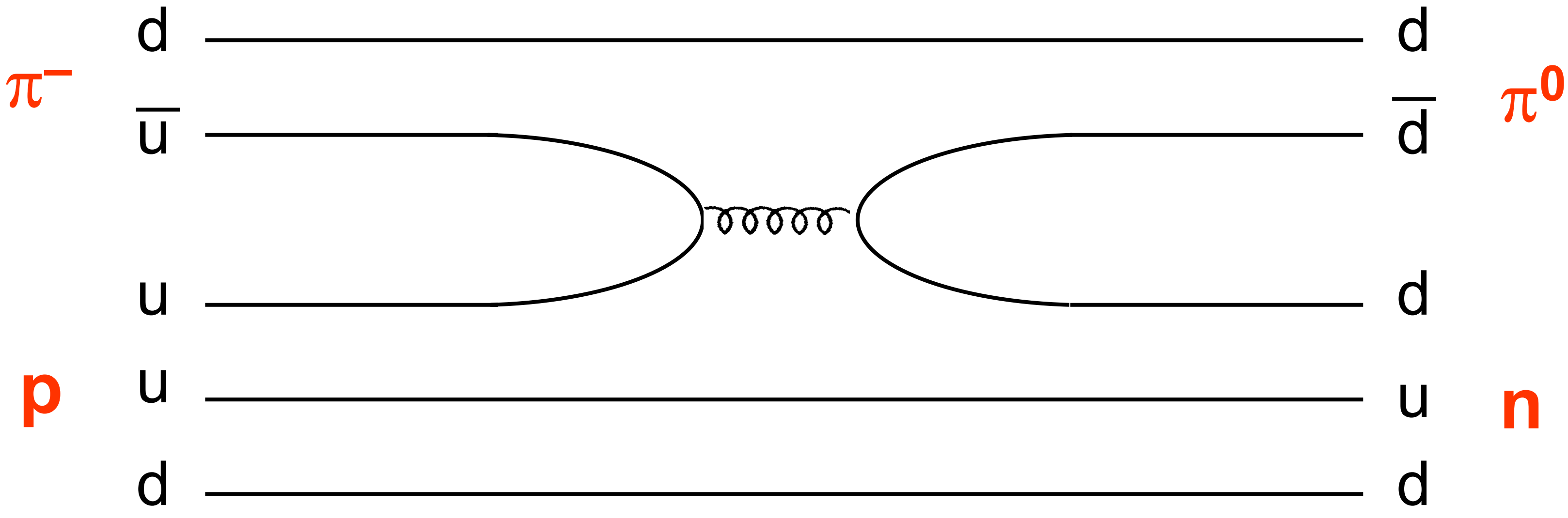
mała
energia



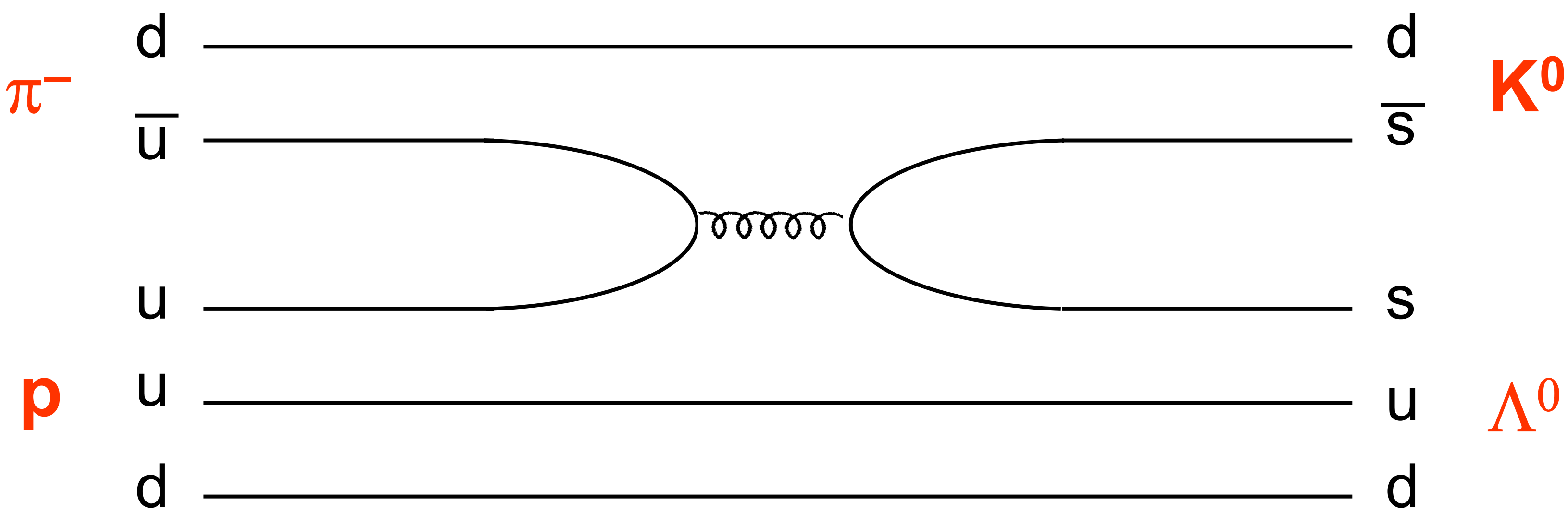
duża
energia



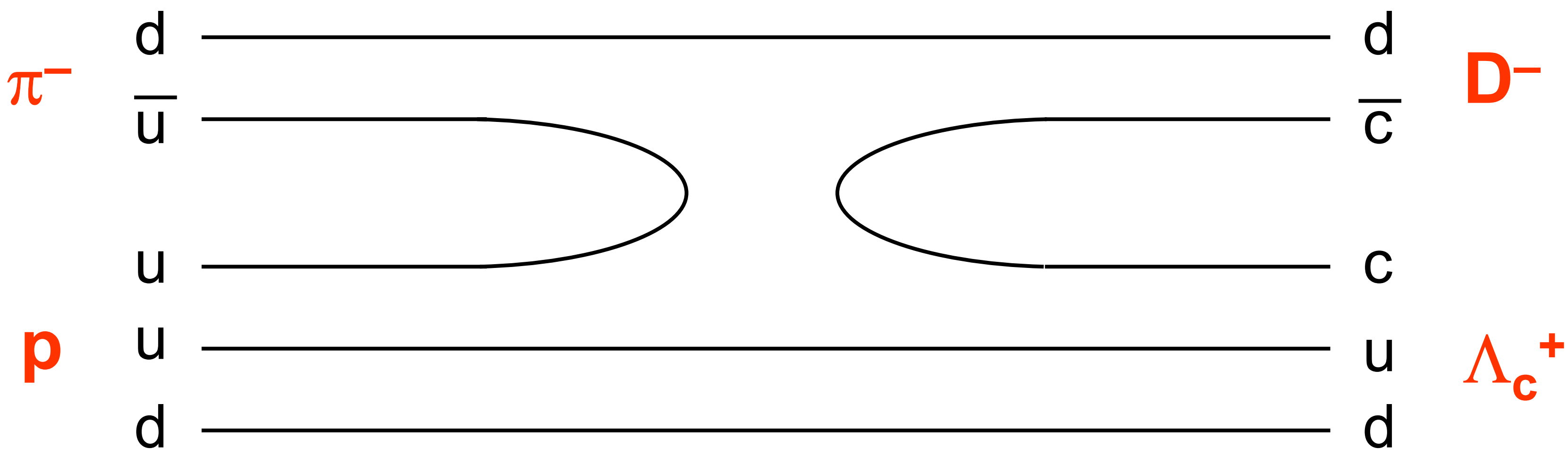
reakcja wymiany ładunku



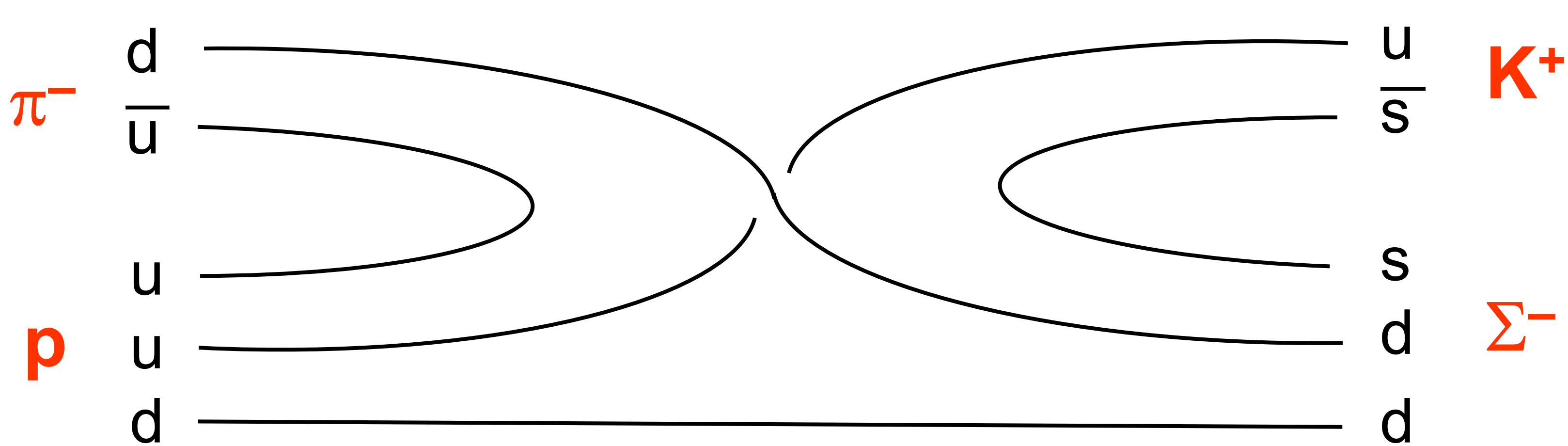
produkcja pary cząstek dziwnych



produkcja pary cząstek powabnych



produkcja pary cząstek dziwnych



$\pi^- + p \not\to K^- + \Sigma^+$ $\quad$ $(\bar{u}d) + (uud) \not\to (\bar{u}s) + (suu)$

Złota reguła Fermiego

Prawdopodobieństwo oddziaływania na jednostkę czasu wynosi

$$W = \frac{2\pi}{\hbar}\,\rho(E)\,\left|M\right|^2$$

objętość komórki w przestrzeni fazowej $V = h^3 = (2\pi\hbar)^3$

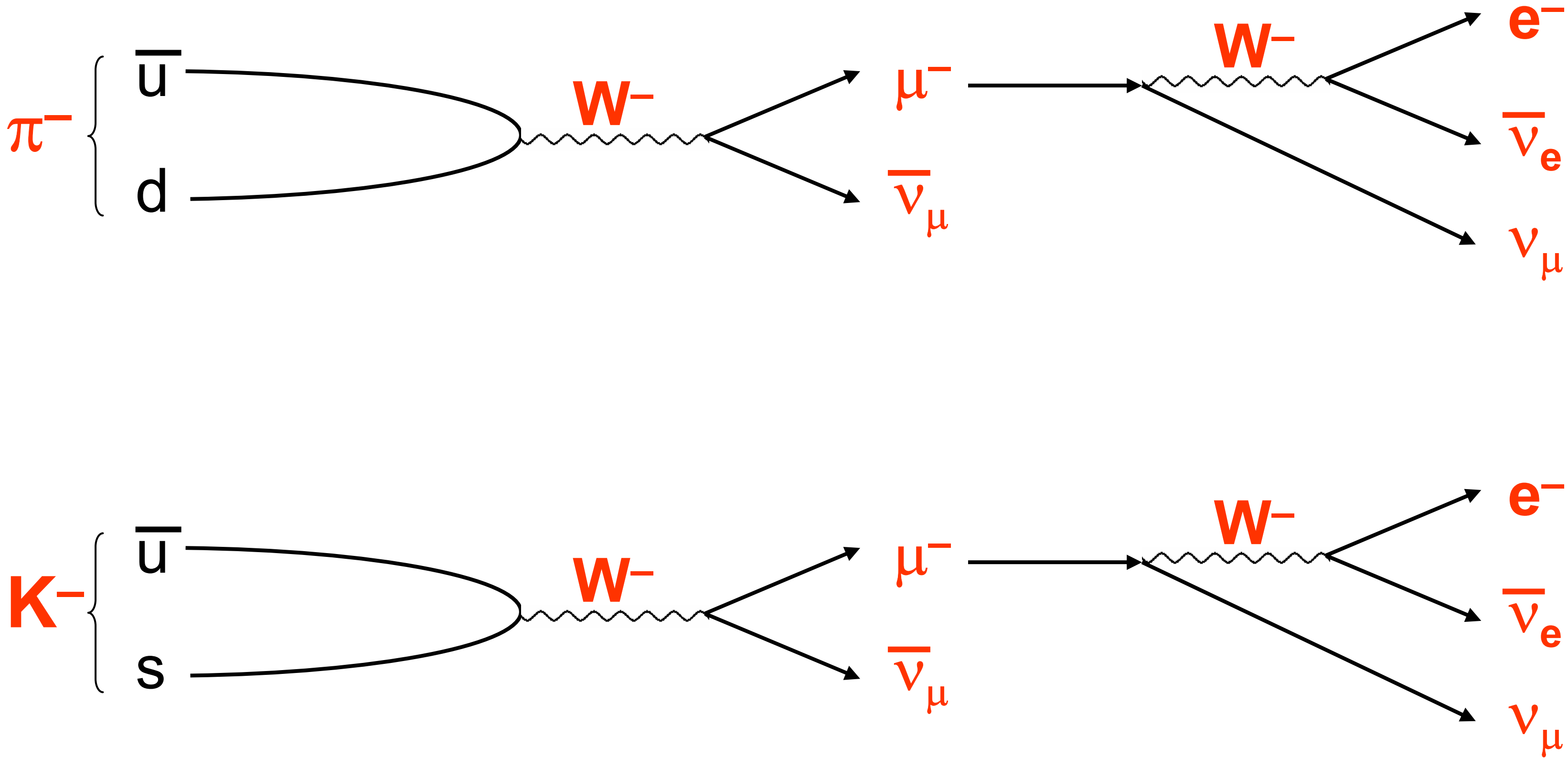
dla cząstki o pędzie w przedziale p i p + dp objętość powłoki kulistej w przestrzeni pędów wynosi $4\pi p^2 dp$

gęstość dostępnych stanów $dn(p) = V\,4\pi p^2 dp/(2\pi\hbar)^3$

uwzględniając $dE = v\,dp$ dostajemy

$$\rho(E) = \frac{dn(E)}{dE} = \frac{V\,4\pi p^2}{v(2\pi\hbar)^3}$$

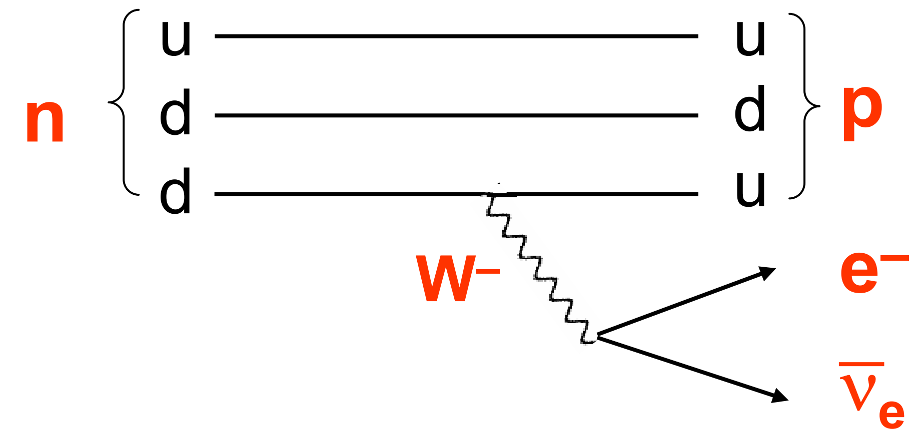
dla rozpadów $W = 1/\tau$



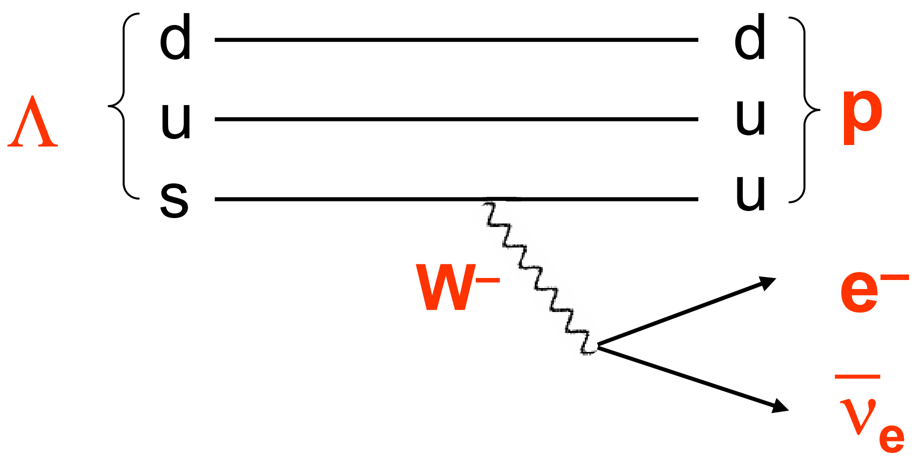
porównanie tych rozpadów daje <u>różne</u> stałe sprzężenia

bardziej odpowiednie rozwiązanie: mieszanie kwarków

[Nicola Cabibbo, Phys. Rev. Lett. **10**, 531 (1963)]



„Cabibbo favoured"



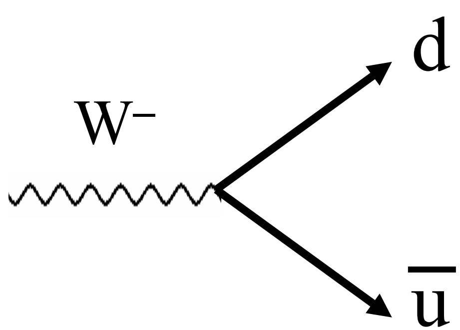
„Cabibbo suppressed"

Nicola Cabibbo, Phys. Rev. Lett. **10**, 531 (1963)

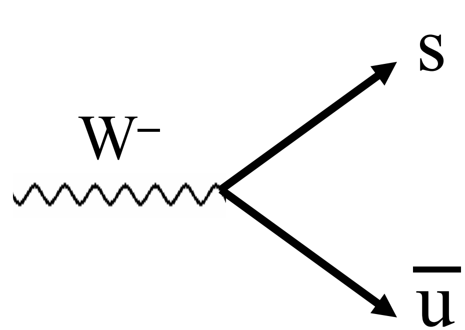
Kwarki „dolne” są zmieszane (konwencja)

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

$$\begin{pmatrix} u \\ d_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d\ \cos\theta_c + s\ \sin\theta_c \end{pmatrix}$$

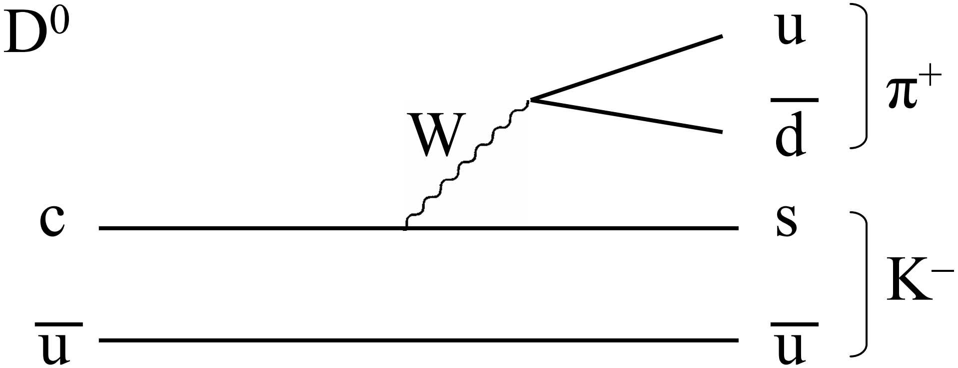


$\cos\theta_c$

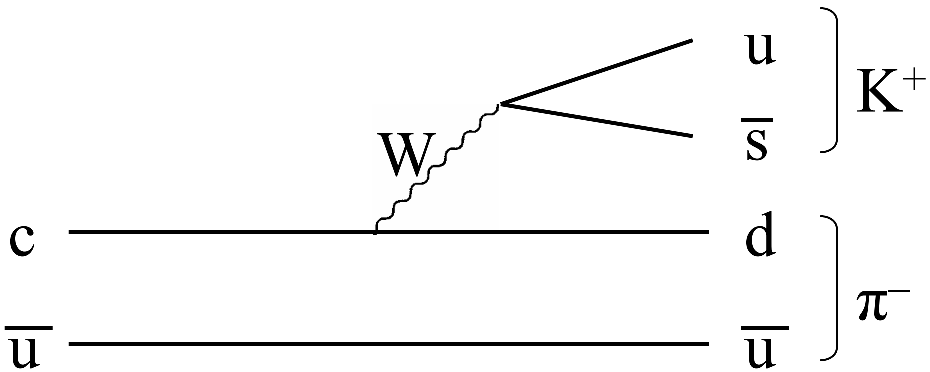


$\sin\theta_c$

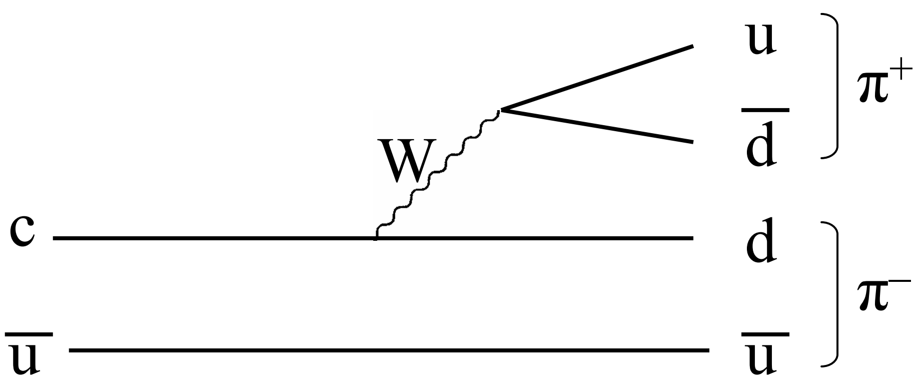
PDG 2008



$\cos^2\theta_c$ $(3{,}89 \pm 0{,}05)\times 10^{-2}$



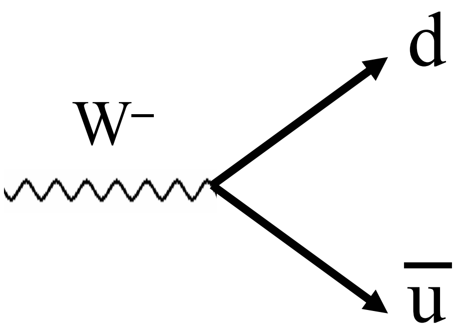
$\sin^2\theta_c$ $(1{,}48 \pm 0{,}07)\times 10^{-4}$



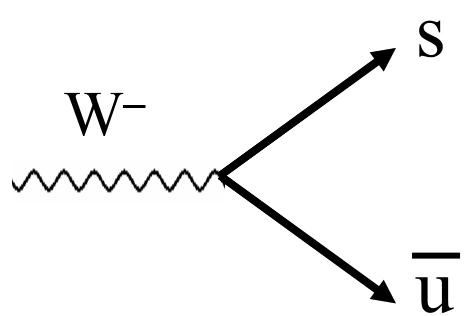
$\cos\theta_c \sin\theta_c$ $(1{,}397 \pm 0{,}027)\times 10^{-3}$

4 leptony i 3 kwarki

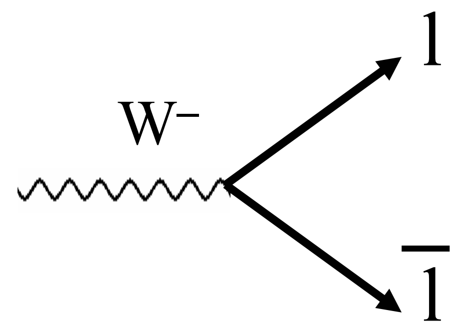
$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} u \\ d_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d\ \cos\theta_c + s\ \sin\theta_c \end{pmatrix}$$



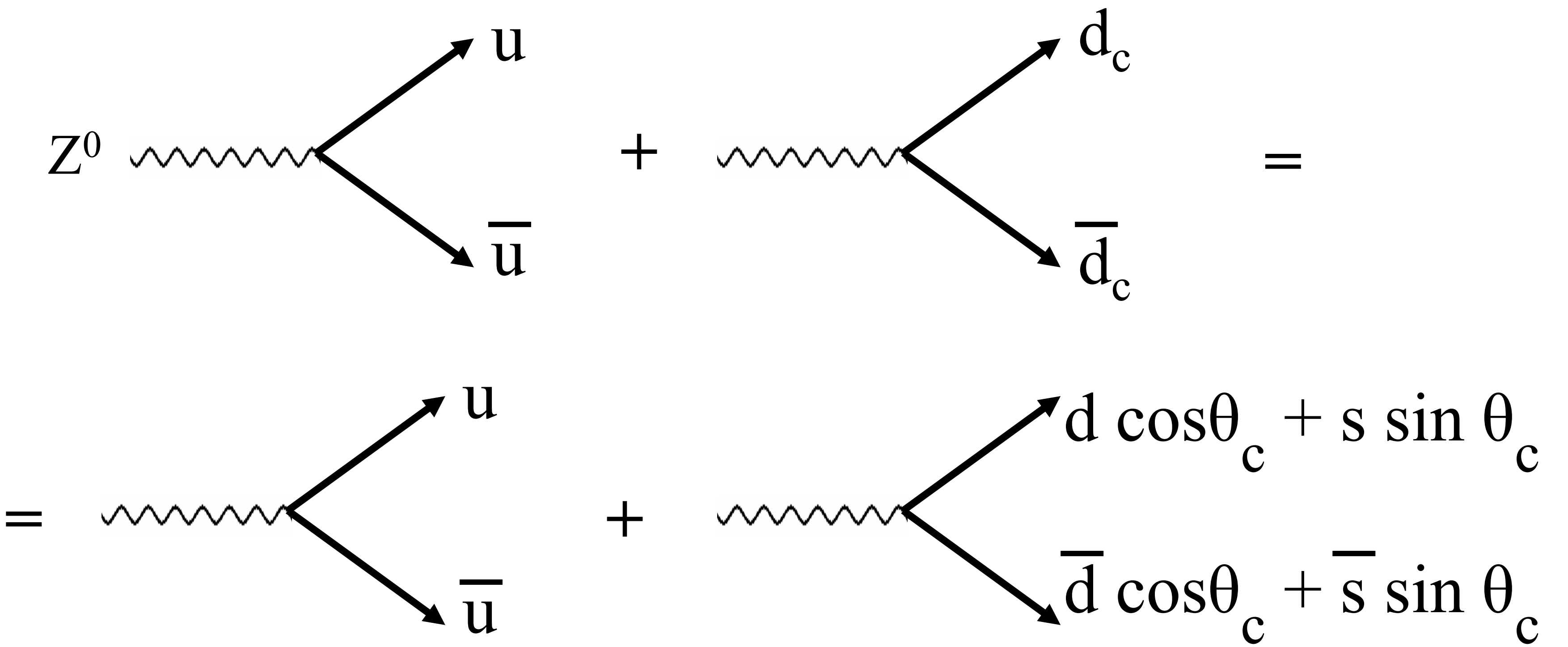
$\cos\theta_c$



$\sin\theta_c$



Problem z bozonami neutralnymi Z^0



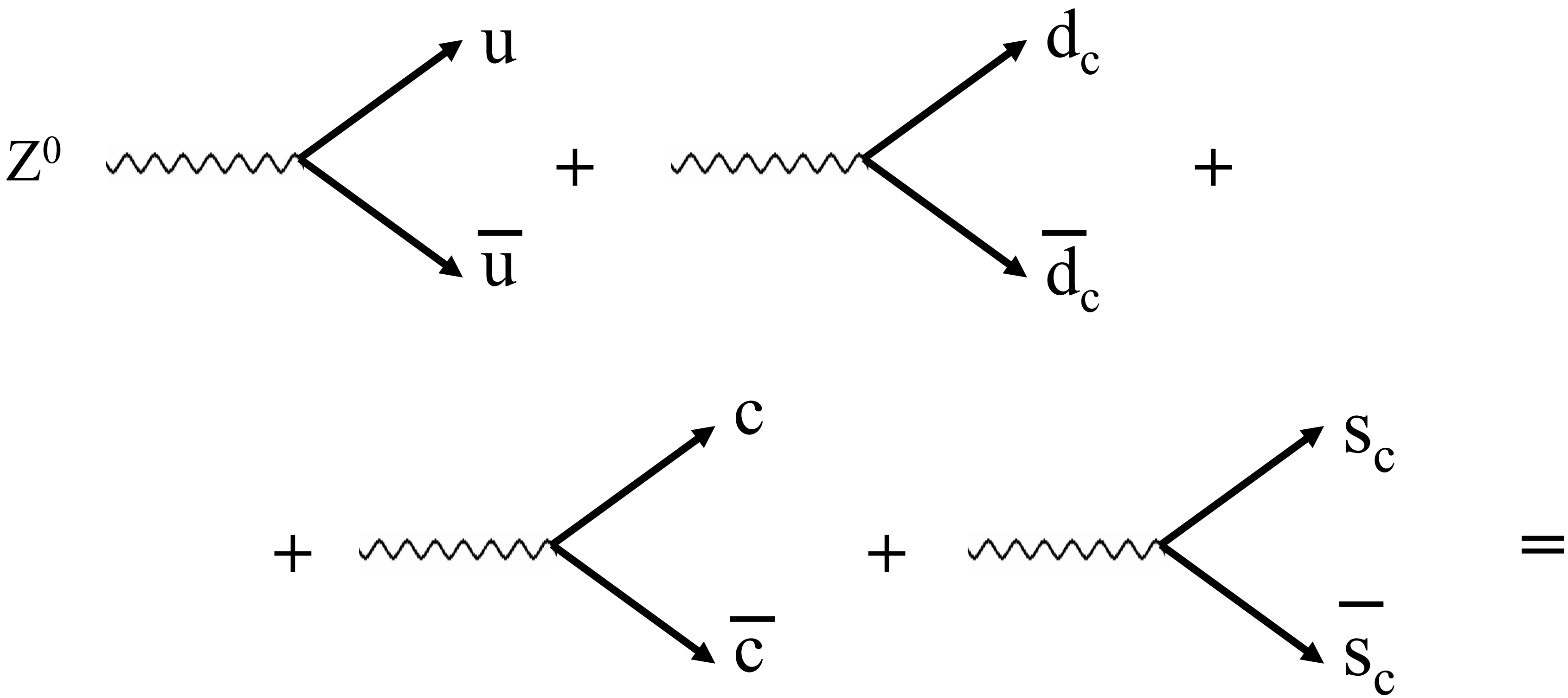
$$NC \sim \underbrace{u\bar{u} + \left(d\bar{d}\,\cos^2\theta_c + s\bar{s}\,\sin^2\theta_c\right)}_{\Delta S = 0} + \underbrace{\left(s\bar{d} + \bar{s}d\right)\sin\theta_c \cos\theta_c}_{\Delta S = 1}$$

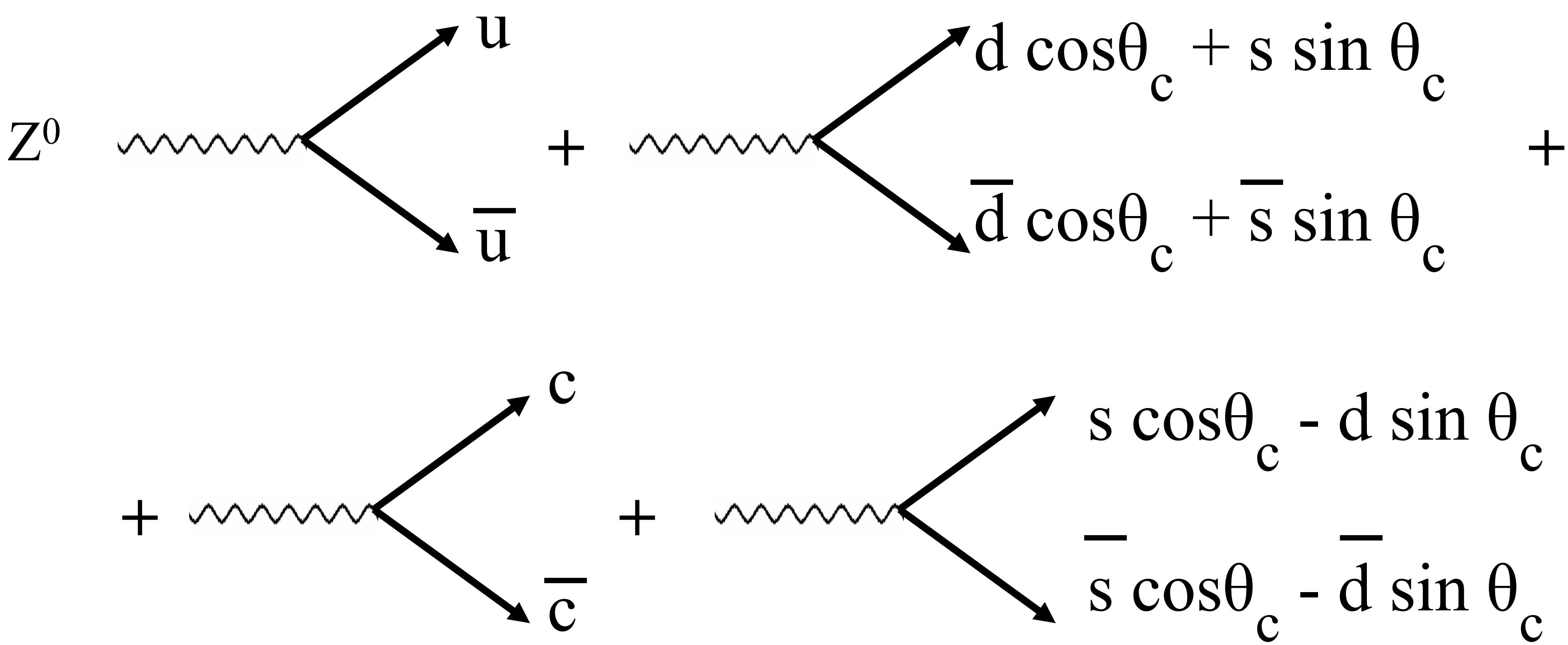
Prądy neutralne zmieniające zapach
(*flavour changing neutral currents* – FCNC) – nie obserwowane!

Mechanizm GIM

(Glashow, Iliopoulos, Maiani, Phys. Rev. **D2**, 1285 (1970))

$$\begin{pmatrix} u \\ d_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d\ \sin\theta_c + s\ \sin\theta_c \end{pmatrix} \quad \text{oraz} \quad \begin{pmatrix} c \\ s_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ s\ \cos\theta_c - d\ \sin\theta_c \end{pmatrix}$$

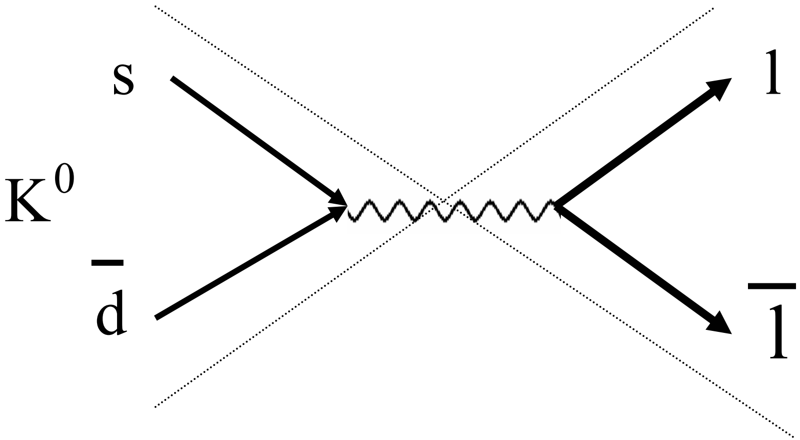




$$NC \sim u\bar{u} + c\bar{c} + (d\bar{d} + s\bar{s}) \cos^2\theta_c + (d\bar{d} + s\bar{s}) \sin^2\theta_c +$$

$$+ \underbrace{(s\bar{d} + \bar{s}d - s\bar{d} - \bar{s}d)\ \sin\theta_c \cos\theta_c}_{=\ 0}$$

Nie ma FCNC !



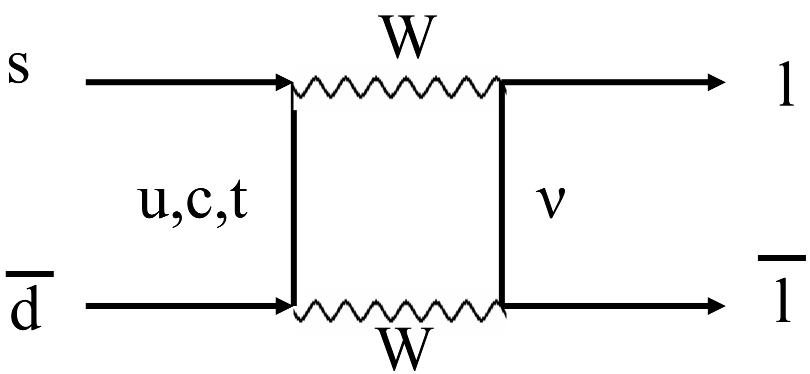
PDG 2008

$K^0_S \to \mu^+\mu^-$ $< 3{,}2 \times 10^{-7}$

$K^0_L \to \mu^+\mu^-$ $(6{,}84 \pm 0{,}11) \times 10^{-9}$

$K^0_L \to e^+e^-$ $(9^{+6}_{-4}) \times 10^{-12}$

Takie rozpady możliwe w procesach drugiego rzędu



Uogólnienie schematu Cabibbo na trzy generacje kwarków

Macierz Cabibbo-Kobayashi-Maskawy (CKM)

Makoto Kobayashi i Toshihide Maskawa, Prog. Theor. Physics **49**, 652 (1973)

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

Macierz Cabibbo jest macierzą obrotu (w płaszczyźnie) – 1 parametr θ_c

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

Macierz CKM jest macierzą obrotów w trzech wymiarach
Ma 4 parametry niezależne: 3 kąty Eulera i fazę

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

Oryginalna parametryzacja macierzy Kobayashi-Maskawy

$s_i = \sin\theta_i$, $c_i = \cos\theta_i$; $i = 1, 2, 3$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & s_1 c_3 & s_1 s_3 \\ -s_1 c_2 & c_1 c_2 c_3 + s_2 s_3 e^{i\delta} & c_1 c_2 c_3 - s_2 c_3 e^{i\delta} \\ -s_1 s_2 & c_1 s_2 c_3 - c_2 s_3 e^{i\delta} & c_1 s_2 s_3 + c_2 c_3 e^{i\delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

w granicy $\theta_2 = \theta_3 = \delta = 0$ mamy redukcję do zwykłego mieszania Cabibbo $\theta_1 = \theta_c$ = kąt Cabibbo, $s_2 = s_3 = 0$, $c_2 = c_3 = 1$

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

Wartości elementów macierzy CKM z PDG 1986

$$\begin{pmatrix} 0{,}9742 \text{ to } 0{,}9756 & 0{,}219 \text{ to } 0{,}225 & 0 \text{ to } 0{,}008 \\ 0{,}219 \text{ to } 0{,}225 & 0{,}973 \text{ to } 0{,}975 & 0{,}037 \text{ to } 0{,}053 \\ 0{,}002 \text{ to } 0{,}018 & 0{,}036 \text{ to } 0{,}052 & 0{,}9986 \text{ to } 0{,}9993 \end{pmatrix}$$

Ze względu na eksperymentalnie wyznaczone wartości elementów macierzy CKM wygodnie jest sparametryzować ją inaczej

Parametryzacja macierzy CKM według Lincolna Wolfensteina
(Phys. Rev. Letters **51**, 1945 (1983))

$$V = \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

(rozwinięcie macierzy CKM względem małego parametru λ)

Eksperyment (PDG 2008):

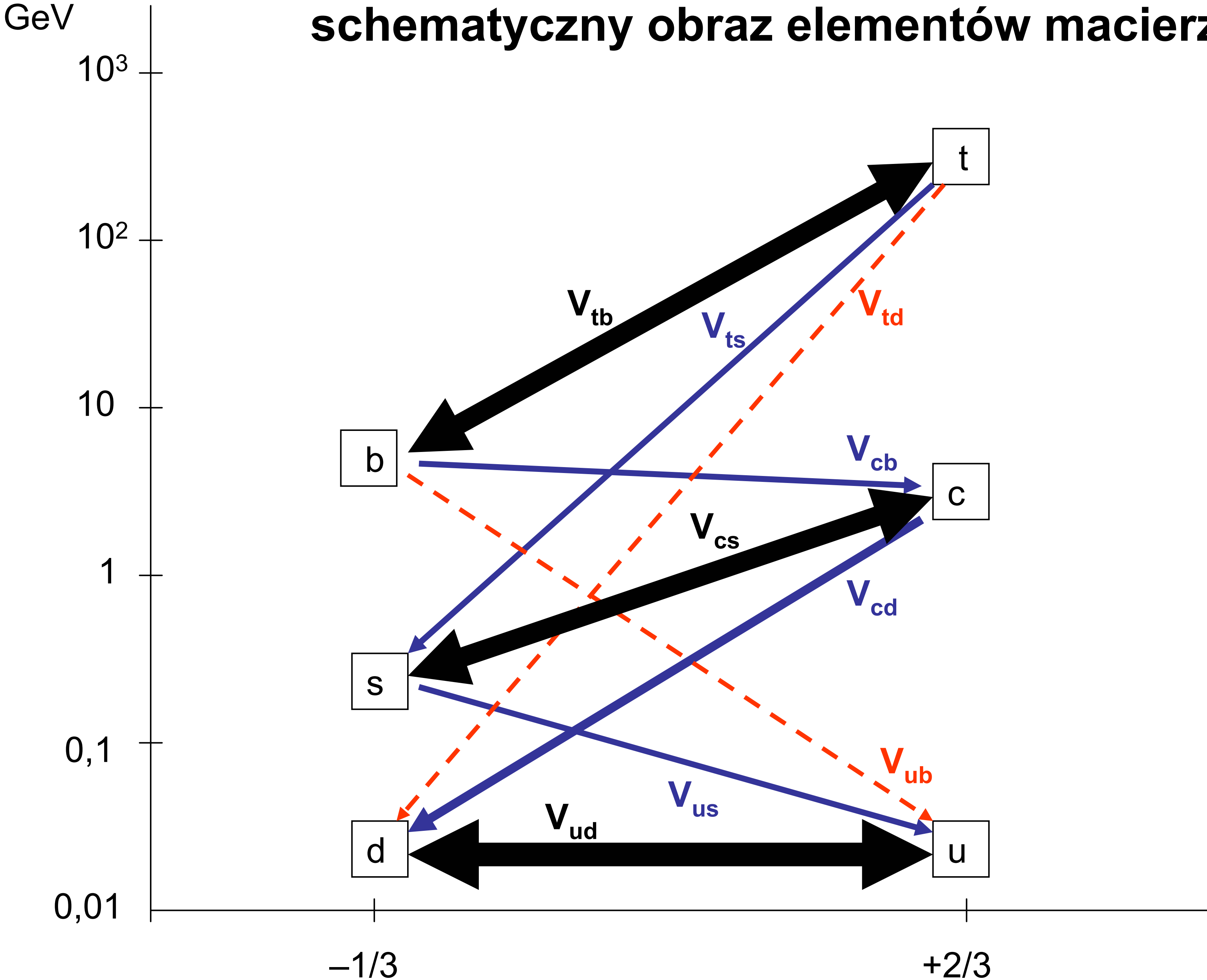
$$\lambda = 0{,}2257^{+0{,}0009}_{-0{,}0010} \qquad A = 0{,}814^{+0{,}021}_{-0{,}022}$$

Macierz Cabibbo-Kobayashi-Maskawy (CKM)

Wartości z tablic PDG 2008 (90% CL)

$$\begin{pmatrix} 0,97419^{+0,00022}_{-0,00100} & 0,2257 \pm 0,0010 & 0,00359 \pm 0,00016 \\ 0,2256 \pm 0,0010 & 0,97334 \pm 0,00023 & 0,0415^{+0,0010}_{-0,0011} \\ 0,00874^{+0,00026}_{-0,00037} & 0,0407 \pm 0,0010 & 0,999133^{+0,000044}_{-0,000043} \end{pmatrix}$$

schematyczny obraz elementów macierzy CKM



Macierz CKM jest unitarna $\sum_i V_{ij} V_{ik}^* = \delta_{jk}$ oraz $\sum_j V_{ij} V_{kj} = \delta_{ik}$

można to przedstawić w postaci trójkąta unitarności

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$$

PDG 2008

$$\alpha + \beta + \gamma = 186^{+31}_{-32} \text{ stopni}$$