

Liczby kwantowe

- symetrie i prawa zachowania
- ładunek elektryczny
- liczba barionowa
- liczba leptonowa
- spin
- skrętność (helicity)
- parzystość przestrzenna
- sprzężenie ładunkowe
- symetria CP
- izospin ***
- parzystość G ***
- dziwność, powab, ... (liczby kwantowe związane z zapachem kwarków) ***

Izospin (przypomnienie)

- Symetrii izospinowej podlegają wszystkie stany mezonowe i barionowe, które są połączone przekształceniem polegającym na zamianie kwarków u i d.

- Znając skład kwarkowy hadronu można wyznaczyć jego izospin.

np. najlżejszy mezon, pion, występuje w trzech stanach ładunkowych (π^+ , π^0 , π^-) które stanowią jedną cząstkę ze względu na oddz. silne.

$$\pi^+ = u \bar{d}, I_3 = +1; \quad \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (d \bar{d} - u \bar{u}), I_3 = 0; \quad \pi^- = d \bar{u}, I_3 = -1$$

- Symetria izospinowa grupuje hadrony w multiplety izospinowe o krotności $2I + 1$

stany izospinowe $| I, I_3 \rangle$

$I = 1/2$ nukleony : **proton** $| 1/2, +1/2 \rangle$ i **neutron** $| 1/2, -1/2 \rangle$

$I = 1$ piony : π^+ $| 1, +1 \rangle$, π^- $| 1, -1 \rangle$, π^0 $| 1, 0 \rangle$

$I = 3/2$ bariony Δ^{++} $| 3/2, +3/2 \rangle$, Δ^+ $| 3/2, +1/2 \rangle$, Δ^0 $| 3/2, -1/2 \rangle$, Δ^- $| 3/2, -3/2 \rangle$

$I = 0$ bariony Λ^0 i Ω^- $| 0, 0 \rangle$

Izospin

Stany izospinowe układu 2 nukleonów ($| I, I_3 \rangle$: proton $| \frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \rangle$, neutron $| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \rangle$)

Stan trypletowy o izospinie $I = 1$, symetryczny względem zamiany $1 \leftrightarrow 2$:

$$| 1, 1 \rangle = p(1)p(2), \quad p - \text{funkcja falowa protonu}$$

$$| 1, 0 \rangle = 1/\sqrt{2} [p(1)n(2) + n(1)p(2)], \quad n - \text{funkcja falowa neutronu}$$

$$| 1, -1 \rangle = n(1)n(2),$$

Stan singletowy o izospinie $I = 0$, antysymetryczny względem zamiany $1 \leftrightarrow 2$:

$$| 0, 0 \rangle = 1/\sqrt{2} [p(1)n(2) - n(1)p(2)]$$

Pełna funkcja falowa układu 2 nukleonów :

$$\psi(\text{pełna}) = \phi(\text{przestrzeń}) \cdot \alpha(\text{spin}) \cdot \chi(\text{izospin}),$$

(dla układu nierelatywistycznego orbitalny i spinowy moment pędu można kwantować niezależnie)

Deuteron (układ proton – neutron) – **pełna funkcja falowa antysymetryczna**

spin 1, spinowa część fn falowej α – symetryczna względem zamiany nukleonów

przestrzenna część fn falowej ϕ symetryczna – symetria $(-1)^l$ względem zamiany

nukleonów, nukleony w deuteronie w stanie $l = 0$ z małą domieszką $l = 2$

izospinowa część fn falowej χ musi być antysymetryczna

→ $I = 0$, deuteron jest izosinguletem

1) $p + p \rightarrow \pi^+ + d$ stan początkowy i końcowy reakcji $I = 1, I_3 = +1$

$$|\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle |\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle \quad |1, 1\rangle |0, 0\rangle$$

reakcja opisana amplitudą $A (I = 1, I_3 = +1 \rightarrow I = 1, I_3 = +1)$

2) $p + n \rightarrow \pi^0 + d$ stan końcowy reakcji $I = 1, I_3 = 0$

$$|\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle |\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle \quad |1, 0\rangle |0, 0\rangle$$

$$= 1/\sqrt{2} |1, 0\rangle + 1/\sqrt{2} |0, 0\rangle$$

stan początkowy reakcji – superpozycja stanu $I = 0$ (50 %) oraz $I = 1, I_3 = 0$ (50 %)

reakcja opisana amplitudą :

$$1/\sqrt{2} [A (I = 1, I_3 = 0 \rightarrow I = 1, I_3 = 0) + A (I = 0 \rightarrow I = 1, I_3 = 0)]$$

amplituda = 0, ze względu na zachowanie izospinu

Ze względu na niezmienniczość względem obrotów w przestrzeni izospinu

$$A (I = 1, I_3 = +1 \rightarrow I = 1, I_3 = +1) = A (I = 1, I_3 = 0 \rightarrow I = 1, I_3 = 0)$$

oraz niewielkie różnice mas protonu i neutronu oraz π^+ i π^0



$$\sigma (p + p \rightarrow \pi^+ + d) = 2 \sigma (p + n \rightarrow \pi^0 + d)$$

zgodnie
z doświadczeniem

Parzystość G

- Operator sprzężenia ładunkowego \hat{C} posiada wartości własne tylko dla cząstek całkowicie obojętnych ($\gamma, \pi^0, \eta, \eta', \rho^0, \omega, \phi, \psi, Y$) oraz układów cząstka – antycząstka, co ogranicza jego zastosowanie
- Wprowadzenie reguł wyboru dla stanów naładowanych
 - dla oddziaływań silnych definiujemy przekształcenie G łączące operację sprzężenia ładunkowego z obrotem izospinu

$$G = CR = C \cdot \exp (i \pi I_2)$$

Przekształcenie G składa się z obrotu R o 180° wokół osi y w przestrzeni izospinu, a następnie operacji sprzężenia ładunkowego C [dla stanu o z-owej składowej izospinu I_3 odpowiada to transformacji $I_3 \rightarrow -I_3$ (obrót) , a następnie przekształceniu $-I_3 \rightarrow I_3 (C)$].

- Wartość własna operatora G – parzystość G
- **Parzystość G jest multiplikatywną liczbą kwantową**
- Parzystość G nie wprowadza nowych informacji poza te związane z symetrią ładunkową i niezmienniczością izospinową, ale umożliwia uproszczenie reguł wyboru dla rozpadów rezonansów mezonowych

Parzystość G

- Parzystość G jest jednoznacznie określona dla neutralnego pionu

$$G | \pi^0 \rangle = CR | \pi^0 \rangle = C(-1)^I | \pi^0 \rangle = - | \pi^0 \rangle, I = 1, C_{\pi^0} = 1, \text{parzystość } G_{\pi^0} = -1$$

- Parzystość G naładowanych pionów

$$G | \pi^+ \rangle = \pm | \pi^+ \rangle, \quad G | \pi^- \rangle = \pm | \pi^- \rangle$$

naładowane piony nie są stanami własnymi C i w operacji sprzężenia ładunkowego pojawia się arbitralny czynnik fazowy. Konwencja : wszystkie składniki trypletu

izospinowego mają taką samą parzystość G jak składnik neutralny $G | \pi \rangle = - | \pi \rangle$

- Parzystość G jest określona dla mezonów, dla których liczby kwantowe dziwności, powabu, piękna, prawdy są równe zero
- Dla multipletu o izospinie I , parzystość G jest określona wzorem $G = (-1)^I C$, gdzie C jest parzystością ładunkową neutralnego składnika multipletu (np. $G_{\pi} = (-1)^1 C_{\pi^0} = -1$)
- Parzystość G dla układu n pionów $G (n\pi) = (-1)^n$

- Stany barionowe nie są stanami własnymi parzystości G (operacja C zmienia znak liczby barionowej)

- Parzystość G dla układu nukleon – antynukleon

$$G | \text{nukleon} - \text{antynukleon} \rangle = (-1)^{L+S+I} | \text{nukleon} - \text{antynukleon} \rangle$$

Parzystość G

Reguły wyboru dla rozpadów rezonansów mezonowych

Cząstka (masa MeV)	$\pi(140)$	$\rho(770)$	$\omega(782)$	$\phi(1020)$	$f_2(1270)$	$\eta(547)$	$\eta'(958)$
Spin i parzystość J^P	0⁻	1⁻	1⁻	1⁻	2⁺	0⁻	0⁻
Izospin I	1	1	0	0	0	0	0
Parzystość C (dla neutralnego składnika multipletu)	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
Parzystość G	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
Dominujący kanał rozpadu na piony	-	2π	3π	3π	2π	3π	5π

Multiplet o izospinie I $\rightarrow G = (-1)^I C$; $G(n\pi) = (-1)^n$

Mezony wektorowe ρ, ω, ϕ i mezon tensorowy f_2 :

rozpady poprzez oddziaływania silne, krotność pionów zgodna z regułą $G = (-1)^n$

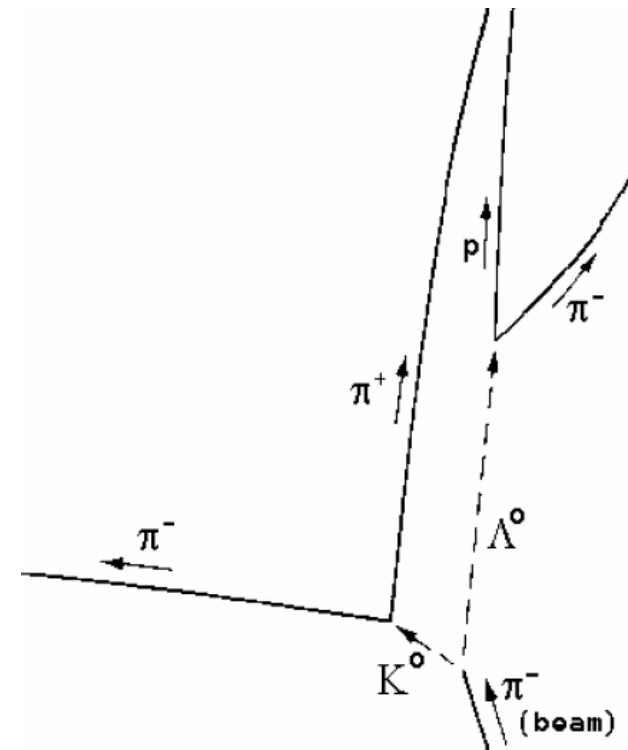
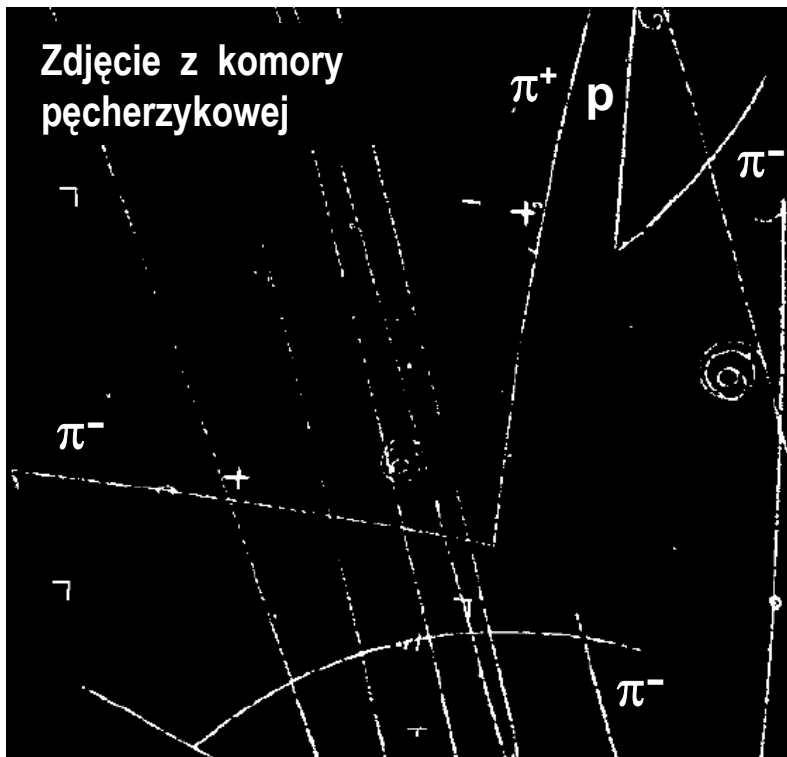
Rozpady $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$ $C_\omega = C_{\pi^0} \cdot C_\gamma = (+1) \cdot (-1) = -1$, $G_\omega = (-1)^0(-1) = -1$;

$\eta \rightarrow 2\gamma, \eta' \rightarrow 2\gamma$ $C = +1$, $G = (-1)^0(+1) = +1$

Rozpady η i η' na nieparzystą liczbę pionów, łamiące parzystość G, poprzez oddz. elektromagnetyczne. Silny rozpad η i η' na dwa piony zabroniony ze względu na zachowanie parzystości P.

Dziwność S

Stowarzyszona produkcja długożyciowych cząstek neutralnych K^0 i Λ^0 w reakcji zachodzącej przez oddziaływania silne $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$.



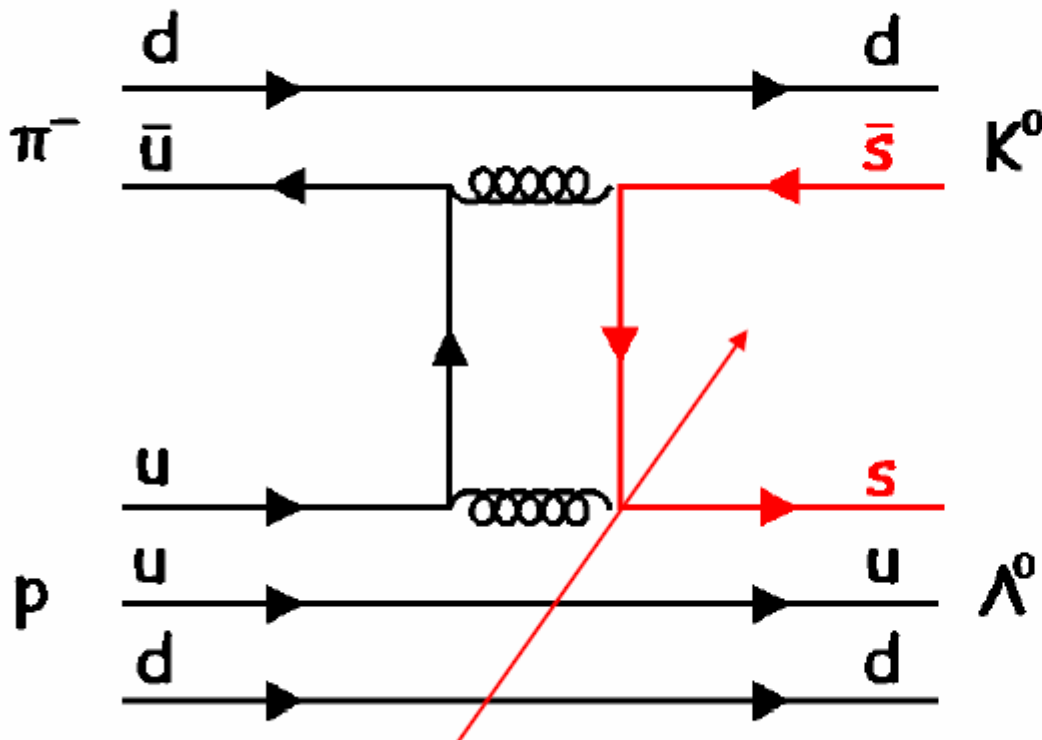
Stowarzyszona produkcja K^0 i Λ^0 związana jest z kreacją w procesie silnym kwarka s i jego antykwarka \bar{s} . Kwarkom tym przypisana jest nowa **liczba kwantowa S nazwana dziwnością, zachowywana przez oddziaływania silne**.

Dziwność jest addytywną liczbą kwantową. Kwark s ma dziwność $S = -1$, antykwarkowi \bar{s} przypisane jest $S = +1$.

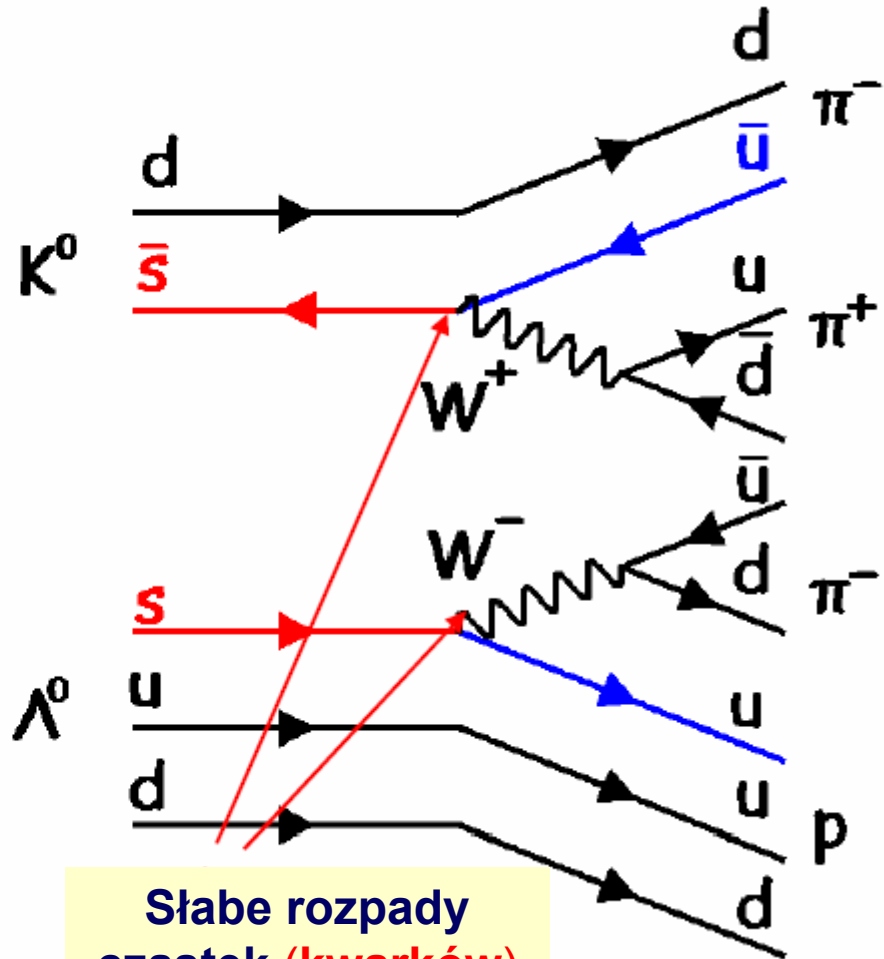
Kwarki dziwne s i \bar{s} rozpadają się poprzez oddz. słabe.

Mezony i bariony zawierające kwark s nazywamy cząstkami dziwnymi.

Dziwność



Produkcja cząstek (kwarków) dziwnych w reakcji zachodzącej przez oddziaływania silne.



Słabe rozpady cząstek (kwarków) dziwnych

Dziwność w stanie początkowym jest taka sama jak dziwność w stanie końcowym.

Zachowanie dziwności w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych

Dziwność nie jest zachowana w oddziaływaniach słabych

Dziwność i inne liczby kwantowe związane z zapachem kwarków ...

Skład kwarkowy niektórych cząstek dziwnych :

$\Lambda^0(\text{uds})$, $\bar{\Lambda}^0(\bar{u}\bar{d}\bar{s})$,

dziwny barion i antybarion

$K^0(\bar{d}s)$, $\bar{K}^0(\bar{d}\bar{s})$,

K^0 nie jest swoją antycząstką

$K^+(\bar{u}s)$, $K^-(\bar{u}\bar{s})$

Dziwność, podobnie jak liczby kwantowe powabu C, piękna B i prawdy T są zachowane przez oddziaływania silne i elektromagnetyczne.

Zachowanie tych liczb kwantowych wynika ze struktury sprzężeń gluonów z kwarkami (oddz. silne) i fotonów z kwarkami (oddz. elektromagnetyczne) :

emisja / absorpcja gluonu / fotonu nie powoduje zmiany zapachu kwarka.

Oddziaływania słabe zmieniają zapach kwarka.

Niezmienniczość izospinowa oddz. silnych dotyczy także cząstek dziwnych (np. K^0 i K^+ oraz \bar{K}^0 i K^- tworzą dublety izospinowe). Oddz. silne cząstek dziwnych i niedziwnych są "identyczne" z dokładnością do efektów wynikających z ich różnych mas.

Relacja Gell – Manna i Nishijimy : związek m-dzy ładunkiem elektrycznym **Q** , trzecią składową izospinu **I₃** , liczbą barionową **B** oraz dziwnością **S**

$$Q = I_3 + (B + S) / 2 = I_3 + Y / 2$$

$$\text{Hiperładunek } Y = B + S$$

Wielkość zachowana		oddz. silne	oddz. em	oddz. słabe
ładunek	Q	✓	✓	✓
liczba barionowa	\tilde{B}	✓	✓	✓
liczba leptonowa	L	✓	✓	✓
izospin	I	✓	X	X
	I_3	✓	✓	X
dziwność S, powab C piękno B, prawda T		✓	✓	X
parzystość przestrzenna	P	✓	✓	X
parzystość ładunkowa	C	✓	✓	X
CP (lub T)	CP	✓	✓	łamanie rzędu 10^{-3}
parzystość G	G	✓	X	X

Twierdzenie CPT – wszystkie oddz. są niezmiennicze względem transformacji będącej złożeniem operacji sprzężenia ładunkowego C, inwersji przestrzennej P i odbicia w czasie T .