

# Liczby kwantowe

---

- sprzężenie ładunkowe
- przykłady i zadania

# Sprężenie ładunkowe

**Sprężenie ładunkowe – przekształcenie symetrii wewnętrznej zamieniające wszystkie cząstki na antycząstki**  
( pozostawiając je w tym samym stanie kwantowym pędu, położenia, ... )

Każdej cząstce odpowiada antycząstka o tej samej masie i czasie życia oraz przeciwnym ładunku, a tym samym przeciwnym momencie magnetycznym (dla punktowej cząstki Diracowskiej o spinie  $\frac{1}{2}$  moment magnetyczny  $\mu = (e\hbar / mc) s$ ;  $e$  - ładunek elektryczny,  $s$  – spin, cząstka i antycząstka mają taki sam spin  $s$  ).

$$\begin{aligned} \hat{C} | \text{proton} \rangle &= \hat{C} | uud \rangle = | \bar{u}\bar{u}\bar{d} \rangle = | \text{antyproton} \rangle \\ \hat{C} | \text{antyproton} \rangle &= | \text{proton} \rangle \\ \hat{C} | \text{neutron} \rangle &= \hat{C} | ddu \rangle = | \bar{d}\bar{d}\bar{u} \rangle = | \text{antyneutron} \rangle \\ \hat{C} | e^+ \rangle &= | e^- \rangle \quad \hat{C} | e^- \rangle = | e^+ \rangle \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{zmiana liczby barionowej, ładunku} \\ \text{i momentu magnetycznego na przeciwny} \\ \text{zmiana liczby barionowej i momentu} \\ \text{magnetycznego na przeciwny} \\ \text{zmiana liczby leptonowej, ładunku i} \\ \text{momentu magnetycznego na przeciwny} \end{array} \right\}$$

$\hat{C}$  – operator sprzężenia ładunkowego,  $| x \rangle$  notacja Diraca bra / ket dla  $\psi_x$  ;  $| p \rangle \equiv \psi_p$

**Operacja sprzężenia ładunkowego zmienia znak wewnętrznych addytywnych liczb kwantowych** ( ładunku elektrycznego, liczby leptonowej i liczby barionowej, l. kwantowych związanych z zapachem kwarków : dziwności, powabu, piękna i liczby T )

# Parzystość ładunkowa

Jeżeli dane oddziaływanie jest niezmiennicze względem operacji sprzężenia ładunkowego to operator  $\hat{C}$  komutuje z hamiltonianem  $[\hat{C}, H] = 0$

+

Sprzężenie ładunkowe – symetria dyskretna, niezwiązana z własnościami czasoprzestrzennymi oddziaływań



Zachowanie multiplikatywnej liczby kwantowej – parzystości ładunkowej

$$\hat{C} |A\rangle = c |A\rangle$$

wartości własne operatora  $\hat{C}$

dwie kolejne operacje sprzężenia ładunkowego przywracają stan wyjściowy



$$C = \pm 1$$

$$\hat{C} |A\rangle = |\bar{A}\rangle \text{ i } \hat{C} |\bar{A}\rangle = |A\rangle \rightarrow \hat{C}^2 |A\rangle = |A\rangle$$

$C$  – parzystość ładunkowa cząstki

Większość cząstek nie jest stanami własnymi operatora  $\hat{C}$

Oddziaływania silne i elektromagnetyczne są niezmiennicze względem sprzężenia ładunkowego, natomiast oddziaływania słabe nie zachowują parzystości  $C$

# Parzystość ładunkowa

Dla jakich cząstek można zdefiniować parzystość  $C$  ?

( jakie cząstki są stanami własnymi operatora  $\hat{C}$  )

**Parzystość ładunkową można zmierzyć jedynie dla cząstek, które są całkowicie obojętne ( np. foton lub neutralny pion  $\pi^0$  ) i są swoimi własnymi antycząstkami**

Rozważmy cząstkę o ładunku  $q$ . Operator ładunku oznaczamy jako  $Q$ .

$$Q | q \rangle = q | q \rangle \quad \text{i} \quad \hat{C} | q \rangle = | -q \rangle$$

$$\hat{C} Q | q \rangle = q \hat{C} | q \rangle = q | -q \rangle \quad \text{oraz} \quad \hat{C} | q \rangle = Q | -q \rangle = -q | -q \rangle$$

$$[\hat{C}, Q] | q \rangle = [\hat{C} Q - Q \hat{C}] | q \rangle = 2q | -q \rangle \rightarrow \text{operatory } \hat{C} \text{ i } Q \text{ komutują jedynie}$$

dla  $q = 0$ , możemy jednocześnie zmierzyć ładunek  $q$  i parzystość ładunkową  $C$

Taki sam wynik otrzymujemy dla innych addytywnych liczb kwantowych.

**Większość cząstek nie jest stanami własnymi operatora  $\hat{C}$**

Tylko cząstki całkowicie obojętne,  
które mają addytywne liczby kwantowe równe zero  
(ładunek, liczba barionowa, liczba leptonowa, dziwność, powab, ...)  
są stanami własnymi operatora sprzężenia ładunkowego,  
np.  $\gamma$ ,  $\rho^0$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $J/\psi$ ,  $Y$  ( $J^{PC} = 1^{--}$ ) oraz  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$  ( $J^{PC} = 0^{-+}$ )

## Układy cząstek

- Parzystość ładunkowa jest określona dla układu cząstek całkowicie obojętnych

np.  $\hat{C} | \gamma\gamma \rangle = C_\gamma C_\gamma | \gamma\gamma \rangle$  **parzystość C jest multiplikatywną liczbą kwantową**

- **Parzystość ładunkową można określić dla układu cząstka – antycząstka ,**

np. dla układu dwóch pseudoskalarnych ( $J^P = 0^-$ ) mezonów  $\pi$

$\hat{C} | \pi^+ \pi^- ; L \rangle = (-1)^L | \pi^+ \pi^- ; L \rangle$  , L – orbitalny moment pędu pary  $\pi^+\pi^-$

- **Dla pary fermion – antyfermion** opisanej poprzez liczby kwantowe całkowitego, orbitalnego i spinowego momentu pędu J, L i S

$\hat{C} | f \bar{f} ; J, L, S \rangle = (-1)^{L+S} | f \bar{f} ; J, L, S \rangle$

( parzystości C dla układów cząstka – antycząstka wynikają z kwantowej teorii pola )

## **Zadania / przykłady**

**Lista cząstek elementarnych, ich parametry i liczby kwantowe**

**Przeglądowe omówienia najważniejszych aspektów teoretycznych i doświadczalnych fizyki cząstek elementarnych , techniki doświadczalne, ...**

**Publikacje " The Particle Data Group" (PDG)**

**w " The Review of Particle Physics"**

**[http ://pdg.lbl.gov](http://pdg.lbl.gov)**

# Parzystość ładunkowa

Model kwarków :  $\pi^0$  jest stanem  $^1S_0$  zbudowanym z pary  $u\bar{u}$  lub  $d\bar{d}$

spin i kręt pary  $q\bar{q}$   $S = L = 0 \rightarrow C_{\pi^0} = (-1)^{L+S} = (-1)^0 = +1$

**parzystość ładunkowa neutralnego mezonu  $\pi^0$  jest dodatnia**

**Eksperyment : potwierdzenie przewidywania modelu kwarkowego**

- dominujący kanał rozpadu  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$   $C_{\pi^0} = (C_\gamma)^2$   
rozpad elektromagnetyczny – zachowanie parzystości C
  - parzystość ładunkowa fotonu  $C_\gamma = -1$
  - rozpad  $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$  jest zabroniony  $C_{\pi^0} = 1 \neq (C_\gamma)^3 = -1$   
eksperyment :  $\Gamma(\pi^0 \rightarrow 3\gamma) / \Gamma(\pi^0 \rightarrow 2\gamma) < 3 \cdot 10^{-8}$
- $C_{\pi^0} = +1$**

**Parzystość ładunkowa fotonu** ( kwantu pola elektromagnetycznego )

wynika z własności klasycznego pola elektromagnetycznego, wytwarzanego przez poruszające się ładunki, opisanego potencjałem wektorowym  $\mathbf{A}$  i skalarnym  $\phi$

**operacja sprzężenia ładunkowego** : pole elektryczne  $\mathbf{E}$  i potencjał skalarny  $\phi$  zmieniają znak

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) \rightarrow -\mathbf{E}(\mathbf{x}, t), \quad \phi(\mathbf{x}, t) \rightarrow -\phi(\mathbf{x}, t) \\ \text{potencjał wektorowy} \quad \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) \rightarrow C_\gamma \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) \\ \mathbf{E} = -\nabla\phi - \partial\mathbf{A}/\partial t \end{array} \right\}$$

**parzystość ładunkowa fotonu jest ujemna**

$$C_\gamma = -1$$

# Parzystość ładunkowa

Rozpady  $\eta$  (550),  $J^P = 0^-$ , struktura kwarkowa  $\eta$  ( $\bar{u}u, \bar{d}d, \bar{s}s$ )

stosunki rozgałęzień ( branching ratio )

1.  $\eta \rightarrow 2\gamma$   $B = 0.39$  rozpad elektromagnetyczny
2.  $\eta \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$   $B = 0.32$  podobna częstość jak dla rozpadu 1 oraz czas życia  $\eta$  ( $\tau = 6 \cdot 10^{-19} \text{ s}$ ) wskazują, że rozpady 2 i 3 są także elektromagnetyczne
3.  $\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$   $B = 0.23$

$$\eta \rightarrow 2\gamma \quad C_\eta = (C_\gamma)^2 = (-1)^2 = +1$$
$$\eta \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0 \quad C_\eta = (C_{\pi^0})^3 = 1^3 = +1$$
$$J^{PC}(\eta) = 0^{-+}$$

Test niezmienniczości względem sprzężenia ładunkowego dla reakcji :

1.  $\eta \rightarrow \pi^+(p_1) + \pi^-(p_2) + \pi^0(p_3)$  cząstki w stanie końcowym posiadają pewien rozkład pędów
2.  $\eta \rightarrow \pi^-(p_1) + \pi^+(p_2) + \pi^0(p_3)$

jeżeli oddziaływania elektromagnetyczne zachowują parzystość C, to reakcja 2 będąca wynikiem operacji sprzężenia ładunkowego reakcji 1, powinna być od niej nierozróżnialna

→ rozkłady pędów mezonów  $\pi^+$  i  $\pi^-$  powinny być identyczne.

**Eksperyment :** rozkłady  $\pi^\pm$  są zgodne w zakresie błędów eksperymentalnych <sub>8</sub>



## Spin neutralnego pionu $\pi^0$

$\pi^0$  - najlżejszy hadron ( nie może się rozpadać poprzez oddziaływania silne )

$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  dominujący kanał rozpadu,  $\sim 98.8\%$ , **rozpad elektromagnetyczny**  
średni czas życia  $\tau_{\pi^0} = ( 8.4 \pm 0.6 ) \cdot 10^{-17} \text{ s}$

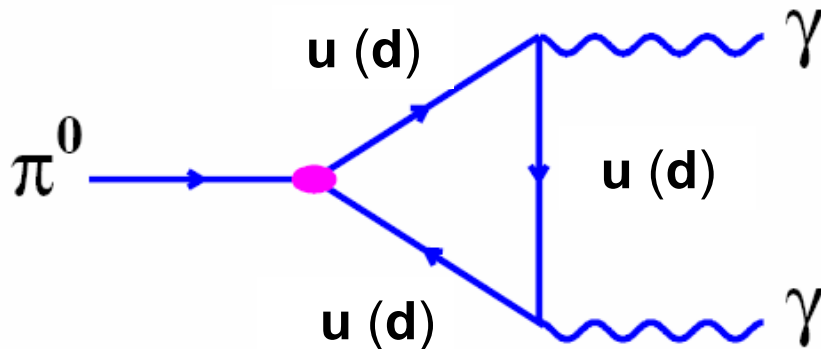


Diagram trójkątny  
dla rozpadu  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

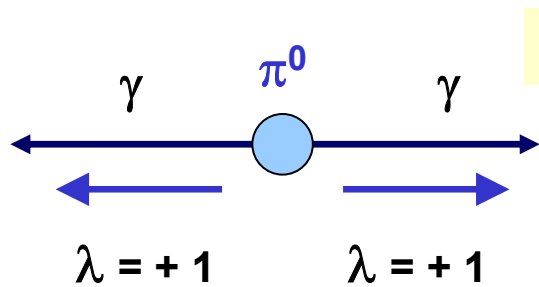
Poprawne obliczenie szerokości rozpadu  $\pi^0$  wymaga uwzględnienia  
3 kolorów kwarków

Analiza rozpadu  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  -  $\pi^0$  jest cząstką o spinie  $s = 0$

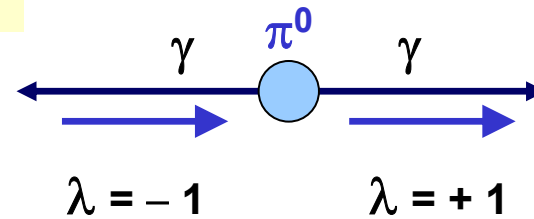
Spin naładowanych pionów ( $s_\pi = 0$ ) wyznaczony z porównania przekrojów  
czynnych dla odwracalnych reakcji  $p + p \leftrightarrow \pi^+ + d$  ( podręcznik Perkinsa )

# Spin neutralnego pionu $\pi^0$

rozpad  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  w układzie spoczynkowym mezonu (  $\vec{p}_{\pi^0} = 0$  )



(spin fotonu  $s_\gamma = 1$  )



2 fotony o takiej samej polaryzacji  
prawo (rys) lub lewoskrętne,  $S_z = 0$

2 fotony o przeciwnej polaryzacji  
 $S_z = 2$

- Rozpad  $\pi^0$  na cząstki o spinie całkowitym  $\rightarrow$  mezony  $\pi^0$  mają spin całkowity
- W układzie spoczynkowym  $\pi^0$  składowa z spinu dla układu 2 fotonów  $S_z = 0$  lub  $S_z = 2$  ( jako oś kwantyzacji wybieramy linię lotu fotonów )  
Rzeczywiste fotony występują tylko w 2 stanach spinowych o skrętności  $\lambda = \pm 1$ , (  $S_z = \pm s_\gamma$ , osią kwantyzacji jest kierunek pędu fotonu )
- Jeżeli  $s_\pi = 1 \rightarrow S_z = 0$ , amplituda dla układu 2 fotonów wyraża się poprzez funkcję kulistą  $Y_L^M = Y_1^0(\cos \theta)$ , która przy obrocie o  $180^\circ$  ( odp. zamianie dwóch fotonów ) jest antysymetryczna. Jednakże zgodnie ze statystyką Bosego-Einsteina funkcja falowa 2 identycznych bozonów jest symetryczna  $\longrightarrow s_\pi \neq 1$
- $s_\pi = 0$  lub  $s_\pi \geq 2$  (  $s \geq 2$  wykluczone przez statystyki produkcji pionów –  $\pi^0$ ,  $\pi^+$  i  $\pi^-$  produkowane w równych ilościach, taka sama liczba stanów spinowych )

1. Pokaż, że mezon rozpadający się na parę  $\pi^+\pi^-$  poprzez oddziaływania silne ma parzystość przestrzenną i ładunkową  $P = C = (-1)^J$ , gdzie  $J$  jest spinem mezonu.
2. Mezony  $\rho^0(769)$  o spinie 1 oraz  $f_2^0(1275)$  o spinie 2 rozpadają się przez oddz. silne w kanale  $\pi^+\pi^-$ . Który z rozpadów jest zabroniony przez oddziaływania elektromagnetyczne :  $\rho^0 \rightarrow \pi^0\gamma$ ,  $f_2^0 \rightarrow \pi^0\gamma$  ? Który z rozpadów jest zabroniony w jakimkolwiek oddziaływaniu :  $\rho^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ ,  $f_2^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  ?

ad 1 )  $M \rightarrow \pi^+\pi^-$

**Zachowanie momentu pędu :**

Układ spoczynkowy mezonu

spin mezonu  $J = L_{\pi\pi} + S_{\pi\pi}$ , spin pary pionów  $S_{\pi\pi} = 0$  ( spin i parzystość pionu  $J^P = 0^-$  ),

$L$  – względny orbitalny moment pędu pary  $\pi\pi \rightarrow J = L$

**parzystość przestrzenna mezonu**  $P(\pi^+\pi^-) = (P_\pi)^2 \cdot (-1)^L = (-1)^J$

**parzystość ładunkowa mezonu**  $C(\pi^+\pi^-) = (-1)^{L+S} = (-1)^L = (-1)^J$

Mezon o spinie 0 ma dodatnie parzystości  $C = P = +1$

Mezon o spinie 1 ma ujemne parzystości  $C = P = -1$

Mezon o spinie 2 ma dodatnie parzystości  $C = P = +1, \dots$

**2. Mezony  $\rho^0(769)$  o spinie 1 oraz  $f_2^0(1275)$  o spinie 2 rozpadają się przez oddz. silne w kanale  $\pi^+\pi^-$ . Który z rozpadów jest zabroniony przez oddziaływania elektromagnetyczne :  $\rho^0 \rightarrow \pi^0\gamma$  ,  $f_2^0 \rightarrow \pi^0\gamma$  ? Który z rozpadów jest zabroniony w jakimkolwiek oddziaływaniu :  $\rho^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  ,  $f_2^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  ?**

### Ad 2)

Rozpad obojętnego mezonu  $\rho$  o spinie  $J = 1$  na dwa naładowane piony

$\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  , **parzystość mezonu  $\rho^0$   $C = P = (-1)^J = -1$**  (por. zadanie 1)

$\rho^0 \rightarrow \pi^0\gamma$  ??  $J^{PC}(\pi^0) = 0^{-+}$  ,  $J^{PC}(\gamma) = 1^{--}$

$C(\pi^0\gamma) = C(\pi^0) \cdot C(\gamma) = (+1) \cdot (-1) = -1$

$P(\pi^0\gamma) = P_\pi P_\gamma (-1)^L = (-1)^2(-1)^L = (-1)^L$ ,  $L$  - względny orbitalny moment pędu układu  $\pi^0\gamma$

Spin  $\rho$   $J = 1 = L + S_\gamma$  ,  $L = 0, 1, 2$  może się złożyć ze spinem fotonu na spin jednostkowy

Dla  $L = 1$  parzystość  $P(\pi^0\gamma) = -1$  zgodna z parzystością mezonu  $\rho$

**→ elektromagnetyczny rozpad  $\rho^0 \rightarrow \pi^0\gamma$  jest dozwolony**

Rozpad obojętnego mezonu  $f_2^0$  o spinie  $J = 2$  na dwa naładowane piony

$f_2^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ , **parzystość mezonu  $f_2^0$   $C = P = (-1)^J = +1$**  (por. zadanie 1)

$f_2^0 \rightarrow \pi^0\gamma$  ?? ,  $C(\pi^0\gamma) = C(\pi^0)C(\gamma) = -1 \neq C(f_2^0)$

**→ elektromagnetyczny rozpad  $f_2^0 \rightarrow \pi^0\gamma$  jest zabroniony ze względu na symetrię względem sprzężenia ładunkowego**

## Ad 2) mezon $\rho$ jest cząstką o spinie 1

$\rho^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  ?? , w stanie końcowym dwa identyczne bezspinowe bozony  $\rightarrow$  funkcja falowa  $\psi$  opisująca taki układ symetryczna ze względu na przestawienie cząstek  $1 \leftrightarrow 2$  (statystyka Bosego-Einsteina)

$\psi = \psi(\text{przestrzeń}) \cdot \psi(\text{spin})$ ,  $\psi(\text{spin})$  jest symetryczna,

$\psi(\text{przestrzeń})$  musi być również symetryczna

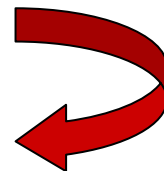
Część przestrzenna funkcji falowej opisuje ruch jednej cząstki względem drugiej i może być zapisana za pomocą funkcji kulistych  $Y_l^m(\theta, \phi)$ . (por. wykład nt. parzystości przestrzennej P). Przestawienie współrzędnych przestrzennych cząstek 1 i 2 jest równoważne zamianie  $\theta \rightarrow \pi - \theta$ ,  $\phi \rightarrow \phi + \pi$  i wprowadza czynnik  $(-1)^L$

mnożący  $\psi(\text{przestrzeń})$ .

$\rho^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ , zachowanie momentu pędu  $\rightarrow$  spin mezonu  $\rho^0$   $J = L = 1$

symetria funkcji falowej wymaga parzystej wartości L

rozpad  $\rho^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  jest zabroniony



$f_2^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  ??, zachowanie momentu pędu  $\rightarrow$  spin mezonu  $f_2^0$   $J = L = 2$

$L = 2$  zapewnia, że funkcja falowa dwóch identycznych bozonów będzie symetryczna

$C(\pi^0\pi^0) = C^2(\pi^0) = (+1)^2 = +1 = C(f_2^0)$ ,  $P(\pi^0\pi^0) = (-1)^J = +1 = C(f_2^0)$  (por. zad. 1),

$\rightarrow$  zachowanie C i P

$\longrightarrow$  silny rozpad  $f_2^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  jest dozwolony

### Zad. 3

Czy rozpad mezonu  $\rho^0 \rightarrow \eta^0 + \pi^0$  może zachodzić poprzez oddziaływania silne lub elektromagnetyczne ?

$$I, J^{PC}(\rho^0) = 1, 1^{--} \quad (\text{por. zad. 1})$$

$$I, J^{PC}(\pi^0) = 1, 0^{-+}$$

$$I, J^P(\eta) = 0, 0^{-}, \quad \eta \rightarrow 2\gamma \quad \text{dominujący kanał rozpadu}$$



$$C(\eta) = C^2(\gamma) = +1$$

$$C(\eta^0\pi^0) = C(\eta^0)C(\pi^0) = +1 \neq C(\rho^0) = -1$$

Silny / elektromagnetyczny rozpad  $\rho^0 \rightarrow \eta^0 + \pi^0$  jest zabroniony ponieważ nie zachowuje parzystości ładunkowej.

Taki rozpad nie jest w ogóle obserwowany.

4. Jakie ograniczenia na spin i parzystość kaonu wynikają z faktu, że obserwowany jest rozpad  $K^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$

statystyka Bosego-Einsteina  $\rightarrow$  spin kaonu jest parzysty (por. zad. 2)

rozpad kaonu przez oddz. słabe  $\rightarrow$  nie ma żadnych ograniczeń na parzystość cząstki

---

5. Anihilacja w spoczynku protonu i antyprotonu zachodzi w stanie S. Wyjaśnij dlaczego reakcja  $p + \bar{p} \rightarrow \pi^0 + \pi^0$  nie może zachodzić przez oddz. silne ?

**anihilacja w stanie S**  $\rightarrow$  orbitalny moment pędu w stanie początkowym  $L = 0$

**parzystość przestrzenna** układu fermion – antyfermion  $P_i = P_{\text{proton}} \cdot P_{\text{antyproton}} (-1)^L = -1$

**dwie identyczne bezspinowe cząstki** w stanie końcowym  $\rightarrow$  symetryczna funkcja falowa ze względu na zamianę cząstek (symetria Bosego-Einsteina)  $\rightarrow$  względny orbitalny moment pędu w układzie  $\pi^0\pi^0$  musi być parzysty (por. zad. 2)

parzystość  $P_f$  w stanie końcowym  $P_f = P_{\pi}^2 (-1)^L = P_{\pi}^2 = +1 \neq P_i$

**Niezachowanie parzystości P w procesie - niedozwolone w oddz.silnych**



6. Mezon  $\eta(547)$  ma spin 0 i rozpada się elektromagnetycznie na 3 piony :  $\eta \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$  i  $\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ . Korzystając z tej informacji wyznacz parzystość przestrzenną  $\eta$ .  $J^P_\pi = 0^-$ . Wyjaśnij dlaczego rozpady  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-$  oraz  $\eta \rightarrow \pi^0\pi^0$  nie są obserwowane ?

Elektromagnetyczny rozpad na  $3\pi$  - zachowanie parzystości P :

Parzystość  $P_\eta$  mezonu  $\eta$  równa jest parzystości  $P_f$  układu  $3\pi$  w stanie końcowym ( w ich układzie środka masy, identycznym z układem spoczynkowym mezonu  $\eta$  )

$$P_\eta = P_f = (P_\pi)^3 (-1)^{L_{12}} (-1)^{L_3}$$

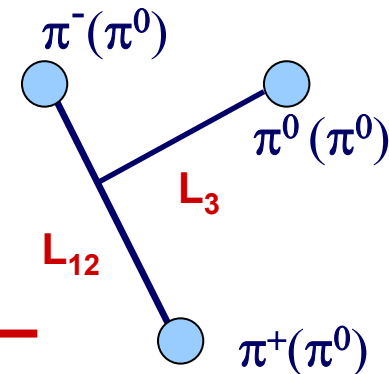
$L_{12}$  – orbitalny moment pędu wybranej pary pionów w ich układzie środka masy

$L_3$  – kręt 3-go pionu względem środka masy pary  $\pi\pi$  w układzie spoczynkowym  $\eta$

Całkowity moment pędu  $L = L_{12} + L_3 = \text{spin } \eta = 0$

$$\rightarrow L_{12} = L_3 \rightarrow \boxed{P_\eta = P_\pi^3 = -1}$$

$\eta$  nie może rozpadać się na  $3\pi$  w procesie silnym ze względu na zachowanie parzystości G ( por. wykład nt. parzystości G )



$$\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^-, \eta \rightarrow \pi^0\pi^0 ?? \quad P_f = P_\pi^2 (-1)^L$$

Zachowanie momentu pędu  $\rightarrow$  2 piony w stanie końcowym mają  $L = 0$  ( $L = J_\eta$ )

$P_f = +1 \neq P_\eta = -1 \rightarrow$  rozpad  $\eta$  na  $2\pi$  zabroniony w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych - parzystość P nie jest zachowana.

Słaby rozpad na  $2\pi$  ma zaniedbywalny stosunek rozgałęzień.

Wielkość zachowana		oddz. silne	oddz. em	oddz. słabe
ładunek	Q	✓	✓	✓
liczba barionowa	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	✓	✓	łamane 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 .

## Przypomnienie

- Wszystkie kwarki i leptonny uczestniczą w oddziaływaniach słabych
- Wszystkie naładowane cząstki biorą udział w oddziaływaniach elektromagnetycznych
- Wszystkie kwarki oddziałują silnie

	Oddz. słabe	Oddz. elektromagnet.	Oddz. silne
Kwarki	tak	tak	tak
Naładowane leptonny	tak	tak	nie
Neutralne leptonny	tak	nie	nie

Foton oddziałuje elektromagnetycznie, składające się z kwarków hadrony biorą udział we wszystkich oddziaływaniach

# Elementarne składniki materii : 3 rodziny leptonów (przypomnienie)

- 3 generacje par leptonowych (naładowany i neutralny lepton) o spinie  $\frac{1}{2}$
- każdy typ (zapach) leptonów posiada odpowiednią liczbę leptonową  $L_e$ ,  $L_\mu$  i  $L_\tau$ , która jest zachowana w Modelu Standardowym z bezmasowymi neutrinami
- Liczne eksperymenty neutrinowe (począwszy od 1998, SuperKamiokande) ewidencja na oscylacje neutrin  $\rightarrow$  neutrina mają masę

## Naładowane leptony

### $e^-$ Elektron

$$M = 0.5 \text{ MeV}, \quad L_e = 1$$

### $\mu^-$ Mion

$$M = 105.7 \text{ MeV}, \quad L_\mu = 1$$

### $\tau^-$ Tau

$$M = 1.78 \text{ GeV}, \quad L_\tau = 1$$

## Neutralne leptony (neutrino)

 $\nu_e$ 

$$M < 3 \text{ eV}, \quad L_e = 1$$

 $\nu_\mu$ 

$$M < 0.19 \text{ MeV}, \quad L_\mu = 1$$

 $\nu_\tau$ 

$$M < 18.2 \text{ MeV}, \quad L_\tau = 1$$

# Elementarne składniki materii : 3 rodziny kwarków ( przypomnienie )

## Terminologia :

kwark górny i dolny (up – down)

kwark powabny i dziwny (charm – strange)

kwark t (top) i b (piękny) (top/truth – beauty/bottom)

**C, S, T, B** - liczby kwantowe określające powab, dziwność, prawdę i piękno kwarka

**Q** - ładunek elektryczny w jednostkach ładunku elektronu

**M** (masa prądowa, *ang. current mass*)- masa, **I** - izospin

<b>Up-Down</b> $I = \frac{1}{2}$	<b>Q = 2/3</b> <b>u</b> M = 1.5 – 4.0 MeV	<b>Q = -1/3</b> <b>d</b> M = 4.0 – 8.0 MeV
<b>Charm-Strange</b> $I = 0$	<b>c</b> M = 1.15 – 1.35 GeV <b>C = 1</b>	<b>s</b> M = 80 – 130 MeV <b>S = -1</b>
<b>Top-Bottom</b> $I = 0$	<b>t</b> M = 174 – 178 GeV <b>T = 1</b>	<b>b</b> M = 4.1 – 4.9 GeV <b>B = -1</b>

Wszystkie kwarki mają liczbę barionową 1/3 i spin 1/2



**Określ poprzez jakie oddziaływanie zachodzą następujące reakcje, opierając się na typie uczestniczących cząstek oraz zachowaniu odpowiednich liczb kwantowych**

1)  $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + \pi^+ + n$

2)  $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$

3)  $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$

4)  $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^-$

5)  $p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$

6)  $\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_\tau$

7)  $D^- \rightarrow K^+ + \pi^- + \pi^-$

8)  $\pi^- \rightarrow \pi^0 + e^- + \bar{\nu}_e$

9)  $\Lambda^0 + p \rightarrow K^- + p + p$

$D^-(1869)$  ( $d\bar{c}$ ) powab  $C = -1$  (neutralne i naładowane mezony D - najlżejsze cząstki powabne)

$\Lambda^0(uds)$  dziwność  $S = -1$ ,  $K^+(u\bar{s})$   $S = +1$ ,  $K^-(\bar{u}s)$   $S = -1$

**Określ poprzez jakie oddziaływanie zachodzą następujące reakcje, opierając się na typie uczestniczących cząstek oraz zachowaniu odpowiednich liczb kwantowych**

---

- |  |  |
|--|--|
| 1) $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + \pi^+ + n$       | oddz. silne  |
| 2) $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$              | oddz. elektromagnetyczne ( $\gamma$ )              |
| 3) $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$             | oddz. słabe (neutrino)                             |
| 4) $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^-$       | oddz. elektromagnetyczne                           |
| 5) $p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ | oddz. silne  |
| 6) $\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_\tau$           | oddz. słabe (neutrino)                             |
| 7) $D^- \rightarrow K^+ + \pi^- + \pi^-$           | oddz. słabe<br>(dziwność i powab nie są zachowane) |
| 8) $\pi^- \rightarrow \pi^0 + e^- + \bar{\nu}_e$   | oddz. słabe (neutrino)                             |
| 9) $\Lambda^0 + p \rightarrow K^- + p + p$         | oddz. silne (zachowanie dziwności)                 |
- 

**Oddz. silne : udział hadronów + zachowanie liczb kwantowych dziwności, powabu ...**

**→ reakcje 1, 5 i 9**

**Reakcja 4 – udział naładowanych leptonów → reakcja em lub słaba, oddz. em silniejsze  
→ oddz. elektromagnetyczne**



## Zad. 6

Określ poprzez jakie oddziaływanie zachodzą następujące reakcje i rozpady cząstek. Jeżeli proces jest zabroniony, uzasadnij dlaczego.

---

1)  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$

2)  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma$

3)  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

4)  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

5)  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$

6)  $p + \bar{p} \rightarrow \Lambda^0 + \Lambda^0$

7)  $p + \bar{p} \rightarrow \gamma$

---

Określ poprzez jakie oddziaływanie zachodzą następujące reakcje i rozpady cząstek. Jeżeli proces jest zabroniony, uzasadnij dlaczego.

1)  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  oddz. silne, zachowanie wszystkich I. kwantowych  
( np. sprawdź izospin i jego trzecią składową,  $I$  i  $I_3$  )

2)  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma$  rozpad elektromagnetyczny – **zabroniony**, ze względu na symetrię względem sprzężenia ładunkowego  $C(\pi^0) = +1 \neq C(3\gamma) = (-1)^3 = -1$

3)  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$  rozpad elektromagnetyczny, dozwolony  
główny kanał rozpadu  $\pi^0$  ( 98.8% )

4)  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  rozpad słaby ( zachowanie mionowej liczby leptonowej)  
 $L_\mu$  0    -1    +1

5)  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$  **zabroniony** rozpad słaby – niezachowanie  $L_\mu$   
 $L_\mu$  0    -1    -1

6)  $p + \bar{p} \rightarrow \Lambda^0 + \Lambda^0$  **zabroniony** – niezachowanie liczby barionowej  $B$   
 $B$  1    -1    1    1

7)  $p + \bar{p} \rightarrow \gamma$  **zabroniony** – czteropęd nie jest zachowany

$\mathbf{p} + \bar{\mathbf{p}} \rightarrow \gamma$     **proces zabroniony** , zasada zachowania energii i pędu nie jest równocześnie spełniona

**Czteropęd w stanie początkowym**     $P_i = ( E_p + E_{\bar{p}}, \mathbf{p}_p + \mathbf{p}_{\bar{p}} )$

$$P_i^2 = (E_p + E_{\bar{p}})^2 - (\mathbf{p}_p + \mathbf{p}_{\bar{p}})^2 = m_p^2 + m_{\bar{p}}^2 + 2(E_p E_{\bar{p}} - \mathbf{p}_p \cdot \mathbf{p}_{\bar{p}}) \geq 2m_p^2 > 0,$$

ponieważ  $E^2 = p^2 + m^2$ ,  $E_p E_{\bar{p}} \geq p_p p_{\bar{p}} \geq \mathbf{p}_p \cdot \mathbf{p}_{\bar{p}}$

**Czteropęd w stanie końcowym**     $P_f = ( E_\gamma, \mathbf{p}_\gamma )$

$$P_f^2 = ( E_\gamma^2 - p_\gamma^2 ) = E_\gamma^2 - E_\gamma^2 = 0$$



$$P_i^2 \neq P_f^2$$

## Zad. 7

Jakie zasady zachowania zabraniają następujących rozpadów

1)  $n \rightarrow p + e^-$

2)  $n \rightarrow \pi^+ + e^-$

3)  $n \rightarrow p + \pi^-$

4)  $n \rightarrow p + \gamma$

## Jakie zasady zachowania zabraniają następujących rozpadów

1)  $n \rightarrow p + e^-$       **naruszona zasada zachowania momentu pędu**

$n, p$  i  $e^-$  – cząstki o spinie  $\frac{1}{2}$

w stanie początkowym    całkowity moment pędu  $J = S_n = \frac{1}{2}$  ,

w stanie    końcowym  $J = L + S$  ,     $S = 0$  lub  $1$

**złożenie spinu z orbitalnym momentem pędu** (  $L$  przyjmuje wartości  $0, 1, \dots$  )



całkowity moment pędu ( połówkowy )  $\neq$  całkowity moment pędu (  $0, 1, \dots$  )

w stanie początkowym

w stanie końcowym

**ponadto nie jest zachowana elektronowa liczba leptonowa**

2)  $n \rightarrow \pi^+ + e^-$

**naruszone zachowanie liczby barionowej i elektronowej liczby leptonowej**

3)  $n \rightarrow p + \pi^-$

**naruszona zasada zachowania energii**

(  $M(\text{neutron}) = 939.56 \text{ MeV}$ ,  $M(\text{proton}) = 938.27 \text{ MeV}$ ,  $M(\pi^-) = 139.57 \text{ MeV}$  )

4)  $n \rightarrow p + \gamma$

**naruszona zasada zachowania ładunku**

## Zad. 8

Jakie zasady zachowania / reguły wyboru zabraniają lub tłumią następujące procesy ?

1)  $p + n \rightarrow p + \Lambda^0$

2)  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^0$

3)  $\Lambda^0 \rightarrow K^0 + \pi^0$

4)  $K \rightarrow \pi + \gamma$

5)  $K^- \rightarrow \pi^0 + e^-$

6)  $K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$

7)  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^0$

# Jakie zasady zachowania / reguły wyboru zabraniają lub tłumią następujące procesy ?

1)  $p + n \rightarrow p + \Lambda^0$  proces tylko z udziałem hadronów wskazywałby na oddz. silne ,

S: 0 0 0 1 ale naruszone zachowanie dziwności i izospinu

izospin w stanie początkowym  $|\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle + |\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle \rightarrow I = 0 \text{ lub } 1, I_3 = 0$

izospin w stanie końcowym  $|\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle + |0, 0\rangle \rightarrow I = \frac{1}{2}, I_3 = \frac{1}{2}$

2)  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^0$

$M(K^+) = 493.68 \text{ MeV}, M(\pi^\pm) = 139.57 \text{ MeV}, M(\pi^0) = 134.98 \text{ MeV}$

**zasada zachowania energii nie jest spełniona**

3)  $\Lambda^0 \rightarrow K^0 + \pi^0$  **liczba barionowa nie jest zachowana** ( proces zabroniony )

4)  $K \rightarrow \pi + \gamma$  rozpad elektromagnetyczny, ale **dziwność nie jest zachowana**  
proces zabroniony

5)  $K^- \rightarrow \pi^0 + e^-$  **elektronowa liczba leptonowa nie jest zachowana**  
proces zabroniony

6)  $K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$  **naruszona symetria CP** - proces silnie tłumiony  
por. wykład nt. niezachowania CP w rozpadach  $K_L^0$

7)  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^0$  **ładunek nie jest zachowany** - proces zabroniony