

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)

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 (γ)
- 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
(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

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 $C = P = +1, \dots$

Ad 2)

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

$\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, parzystość mezonu ρ^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 ρ $J = 1 = L + S_\gamma$, $L = 0, 1, 2$ może się złożyć ze spinem fotonu na spin jednostkowy

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

→ 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)

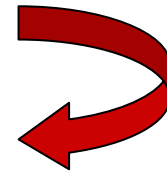
$\rho^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$?? , w stanie końcowym dwa identyczne bezspinowe bozony \rightarrow funkcja falowa ψ opisująca taki układ symetryczna ze względu na przestawienie cząstek $1 \leftrightarrow 2$ (statystyka Bosego-Einsteina)

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

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

Część przestrzenna funkcji falowej opisuje ruch orbitalny 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 ρ^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

5. 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 η . $J^P_\pi = 0^-$. Wyjaśnij dlaczego rozpady $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-$ oraz $\eta \rightarrow \pi^0\pi^0$ nie są obserwowane ?

Elektromagnetyczny rozpady na 3π - zachowanie parzystości P :

Parzystość P_η mezonu η równa jest parzystości P_f układu 3π w stanie końcowym (w ich układzie środka masy, identycznym z układem spoczynkowym mezonu η)

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

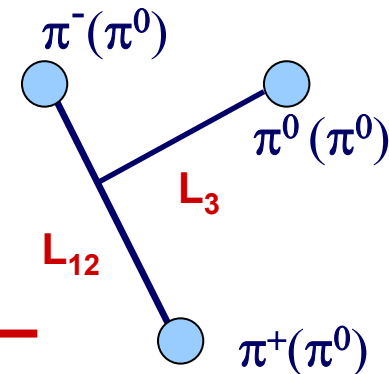
L_{12} – orbitalny moment pędu wybranej pary pionów w ich układzie środka masy

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

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

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

η nie może rozpadać się na 3π 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 η na 2π zabroniony w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych - parzystość P nie jest zachowana.

Słaby rozpad na 2π ma zaniedbywalny stosunek rozgałęzień.

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 π^0 (98.8%)
- 4) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ rozpad słaby (zachowanie mionowej liczby leptonowej)
 L_μ 0 -1 +1
- 5) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$ **zabroniony** rozpad słaby – niezachowanie L_μ
 L_μ 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

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 leptony 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 leptony	tak	tak	nie
Neutralne leptony	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_μ i L_τ , 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

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

μ^- Mion

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

τ^- Tau

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

Neutralne leptony (neutrino)

ν_e

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

ν_μ

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

ν_τ

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

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

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

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