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)

Mechanika klasyczna, trochę teorii ...

- **Układ fizyczny jest opisany przez zależne od czasu (uogólnione) współrzędne $q_i(t)$ i lagranżjan L**
- **Lagranżjan L jest różnicą energii kinetycznej i potencjalnej układu i zależy od współrzędnych q_i, ich pochodnych po czasie $\dot{q}_i$ oraz czasu t**

$$L(q_i, \dot{q}_i, t) = T - V$$

- **Równania ruchu dla układu cząstek można wyprowadzić z równań Eulera - Lagrange'a**

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

Przykład : ruch jednowymiarowy cząstki o masie m w stałym polu grawitacyjnym :

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\dot{x}^2}{2}$$
$$V = mgx$$

$$L(x, \dot{x}, t) = \frac{m\dot{x}^2}{2} - mgx$$

Równanie ruchu cząstki otrzymane z równania Lagrange'a

$$m\ddot{x} = -mg$$

Niezmienniczość (symetria) **równań** opisujących dany układ fizyczny

względem pewnych transformacji ➡ **prawa zachowania !!**

Prawa zachowania wynikają z symetrii


1882 - 1935

Twierdzenie Emmy Noether (1918)

Niezmienniczość teorii (działania Hamiltona, lagranżjanu) względem każdej grupy symetrii ciągłej generuje odpowiednie prawo zachowania

- **Przekształcenia symetrii opierają się na transformacjach, które można wykonać na układzie fizycznym (lub równoważnie na układzie odniesienia) bez zmieniania jego własności**

- **Przewidywania dla obserwabli charakterystycznych dla danego typu procesu nie zmieniają się w wyniku wykonania takich operacji**

Prawa zachowania wynikają z symetrii

Mechanika klasyczna :

Zasady zachowania energii i (momentu) pędu wynikają z niezmienniczości równań ruchu względem transformacji (obrotów i translacji) w czasoprzestrzeni :

- Niezmienniczość względem przesunięcia w czasie → **prawo zachowania energii**
- Niezmienniczość względem translacji w przestrzeni → **prawo zachowania pędu**
- Niezmienniczość względem obrotów w przestrzeni → **prawo zachowania momentu pędu**

Elektrodynamika :

Zachowanie ładunku elektrycznego wynika z niezmienniczości względem transformacji cechowania (gauge invariance) równań Maxwella

Zasady niezmienniczości i prawa zachowania

- **Kwantowe teorie pola, łączące wymogi mechaniki kwantowej i szczególnej teorii względności Einsteina, opisują fundamentalne oddziaływania cząstek elementarnych**
- **W opisie teoretycznym bardzo ważne są zasady niezmienniczości / zasady symetrii związane z poszczególnymi oddziaływaniami, prowadzące do praw zachowania oraz reguł wyboru dotyczących liczb kwantowych**
  - ► **liczby kwantowe związane z własnościami (symetriami) czasoprzestrzennymi oddziaływań**
  - ► **w fizyce b. często wprowadza się pojęcie symetrii wewnętrznych - symetrii w abstrakcyjnych przestrzeniach parametrów**
  - ► te bardziej abstrakcyjne koncepcje dotyczące np. lokalnej symetrii cechowania w chromodynamice kwantowej (niezmienniczość oddziaływań kwarków i gluonów względem lokalnych przekształceń w przestrzeni koloru) czy też spontanicznego naruszenia lokalnej symetrii cechowania w teorii elektrosłabej - wykłady nt. poszczególnych oddziaływań, wykład prof. Praszałowicza o Modelu Standardowym

Mechanika kwantowa, trochę teorii ...

- **Układ cząstek jest opisany przez funkcję falową $\psi(x_i, t)$ zależną od współrzędnych x_i i czasu t oraz przez hamiltonian H (operator hermitowski)**

- **Ewolucja w czasie układu fizycznego wynika z równania Schrödingera**
  $$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$ **, hamiltonian H jest operatorem energii całkowitej , $H\psi = E\psi$**

- **Każdej obserwabli , tzn. wielkości fizycznie obserwowalnej / mierzalnej, odpowiada liniowy operator hermitowski** (np. operator pędu $p_i \rightarrow -i\hbar\, \partial/\partial x_i$)

- **W wyniku pomiaru obserwabli odpowiadającej pewnemu operatorowi F otrzymujemy jakiś wynik, którego wartość oczekiwana** (najbardziej prawdopodobna) **wynosi $\langle F \rangle = \int d^3x\, \psi^* F\, \psi$**

Mechanika kwantowa, trochę teorii …

- Kiedy wartość oczekiwana operatora nie zależy od czasu tzn. **kiedy obserwabla odpowiadająca temu operatorowi jest wielkością zachowaną ?**

$$i\hbar\, dF/dt = i\hbar\, \partial F/\partial t + [F, H]$$

► **Operator, który nie zależy explicite od czasu będzie stałą ruchu, jeżeli komutuje z Hamiltonianem !!**

$$\boxed{[F, H] = FH - HF = 0 \longrightarrow d/dt \langle F \rangle = 0}$$

► **Wartość oczekiwana nie zmienia się w czasie, ponieważ operatory *F* i *H* odpowiadają wielkościom, które mogą być mierzone równocześnie**

Trochę teorii ...

W teorii kwantowej gęstość lagranżjanu zależy od pola cząstki $\Phi(x^{\mu})$

$$q_i \rightarrow \phi(x^{\mu}) \qquad \dot{q}_i \rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial x_{\mu}} \equiv \partial^{\mu}\phi$$

$$L(q_i, \dot{q}_i, t) \rightarrow \mathcal{L}\left(\phi, \frac{\partial \phi}{\partial x_{\mu}}, x_{\mu}\right)$$

Sumowanie po współrzędnych czasowych i przestrzennych μ = 0,1,2,3

Równanie Lagrange'a :

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial x_{\mu}}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial\left(\frac{\partial \phi}{\partial x_{\mu}}\right)}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} = 0}$$

- **Definiując lagranżjan o określonych symetriach jednoznacznie określamy własności cząstek elementarnych i ich oddziaływania w ramach danej teorii**
- **Wybór właściwego lagranżjanu zapewniającego niezmienniczość lorentzowską oraz inne symetrie umożliwia wyprowadzenie z niego hamiltonianu**

Symetrie hamiltonianu : jakie transformacje nie zmieniają hamiltonianu ??

► **Jeżeli prawa opisujące układ fizyczny są niezmiennicze względem pewnej transformacji to istnieje unitarny operator symetrii U ($U^\dagger U = 1$), który komutuje z hamiltonianem ($[H, U] = 0$)**

$\Psi (\mathbf{x}, t) \rightarrow \psi'(\mathbf{x}, t) = U \psi (\mathbf{x}, t)$, ψ (ψ') – funkcje falowe stanu przed (po) transformacją

- **normalizacja prawdopodobieństw** $\int dx \psi^* \psi = \int dx \psi'^* \psi'$ $\longrightarrow$ $U^\dagger U = 1$
- **transformacja nie zmienia przewidywań fizycznych** (wartości oczekiwanej hamiltonianu) $\int dx \psi^* H \psi = \int dx \psi'^* H \psi'$ $\longrightarrow$ $[H, U] = 0$

► **Skończoną transformację ciągłą można złożyć z transformacji infinitezymalnych**

$$U = \lim_{n\rightarrow\infty} (1 + i \varepsilon F) = \exp (i \varepsilon F) , \quad \varepsilon F << 1, F^\dagger = F$$

F (generator transformacji) **jest operatorem hermitowskim i odpowiada obserwabli**

Jeżeli unitarny operator U opisuje symetrię hamiltonianu to wówczas generator transformacji jest stowarzyszony z zachowywaną obserwablą

$[H, U] = 0$	$\longrightarrow$	$[H, F] = 0$
symetria	$\longrightarrow$	**zachowywana obserwabla**
U		**< F >**

Zachowanie liczb kwantowych

- **W ogólności hamiltonian opisujący oddziaływanie cząstek elementarnych będzie zawierał człony odpowiadające 4 fundamentalnym oddziaływaniom :**

$$\boxed{H = H_{silne} + H_{em} + H_{słabe} + H_{grawit.}}$$

- **Każdy z członów może być niezmienniczy względem różnych transformacji**

$$\downarrow$$

zachowanie różnych liczb kwantowych w poszczególnych oddziaływaniach

- **Porównanie liczb kwantowych w stanie początkowym i końcowym danego procesu pozwala określić typ oddziaływania** (ćwiczenia / przykłady)

Teoria $\leftrightarrow$ eksperyment

Doświadczalna ewidencja na zachowanie nowych liczb kwantowych pozwala zidentyfikować symetrie określające własności oddziaływań

$$\downarrow$$

Poprawna konstrukcja hamiltonianu

Zbiór przekształceń każdej symetrii tworzy grupę

- SO(n) grupa macierzy ortogonalnych rzędu n o jednostkowym wyznaczniku
- U(n) grupa macierzy unitarnych rzędu n
- SU(n) grupa macierzy unitarnych rzędu n o jednostkowym wyznaczniku

Rodzaje symetrii :

- **ciągła**

transformacje są funkcjami ciągłych parametrów (np. translacje i obroty przestrzenne)
prowadzi do zachowania wielkości addytywnych (pęd, moment pędu) →
addytywne liczby kwantowe : ładunek elektryczny, liczba barionowa, liczby leptonowe, zapachy kwarków (S, C, B, T)

skończona transformacja ciągła = Σ infinitezymalnych transformacji ciągłych

- **dyskretna**

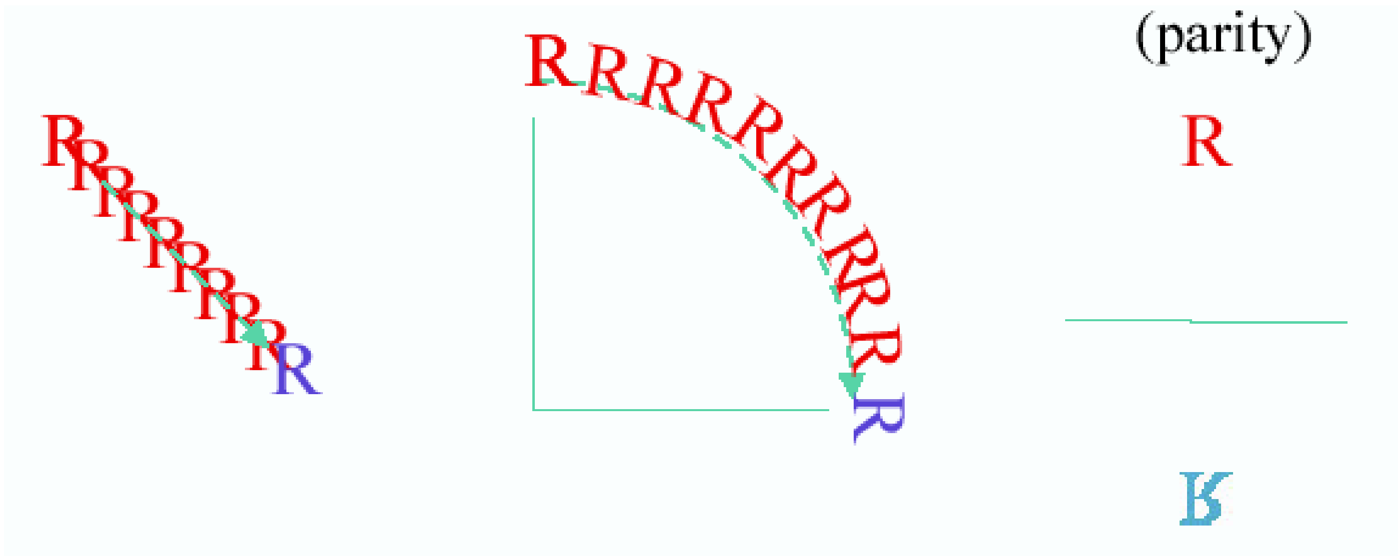
transformacje są funkcjami parametrów dyskretnych
transformacja zachodzi lub nie („all or nothing")

przykłady : inwersja przestrzenna, odwrócenie czasu, sprzężenie ładunkowe

prowadzi do zachowania wielkości multiplikatywnych →
multiplikatywne liczby kwantowe : parzystość przestrzenna, ładunkowa, …

Transformacje ciągłe i dyskretne

translacja **obrót** **odbicie przestrzenne**



transformacja:

ciągła **ciągła** **dyskretna**

Przykłady :

- **Operacja sprzężenia ładunkowego :** ➡ **zmiana znaku ładunku elektrycznego i momentu magnetycznego cząstki na przeciwny**

- **Oddziaływania silne i elektromagnetyczne są niezmiennicze względem takiej transformacji** $\rightarrow$ **zachowanie parzystości ładunkowej C**
  (multiplikatywna liczba kwantowa określona dla obojętnych bozonów będących swoimi antycząstkami) **w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych**

Rozpady mezonu π^0 : $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$??

Rozpad elektromagnetyczny (γ w stanie końcowym)

foton – kwant pola elektromagnetycznego, którego pole elektryczne $\hat{E}$ **$C(\gamma) = -1$**
i potencjał skalarny φ zmieniają znak w wyniku sprzężenia ładunkowego
(zmiana znaku ładunków wytwarzających pole)

parzystość C dla n fotonów : $(-1)^n$, π^0 rozpada się na 2γ ➡ **$C(\pi^0) = +1$**

rozpad $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$ jest zabroniony

eksp. $\pi^0 \rightarrow 3\gamma \ / \ \pi^0 \rightarrow 2\gamma < 3 \cdot 10^{-8}$

Rodzaje symetrii

- **abelowa (przemienna)**

kolejność wykonywania przekształceń składających się na daną symetrię nie ma znaczenia

przykłady : obroty w płaszczyźnie
oddziaływanie elektromagnetyczne grupa U(1) przekształceń
$exp(i\lambda)$

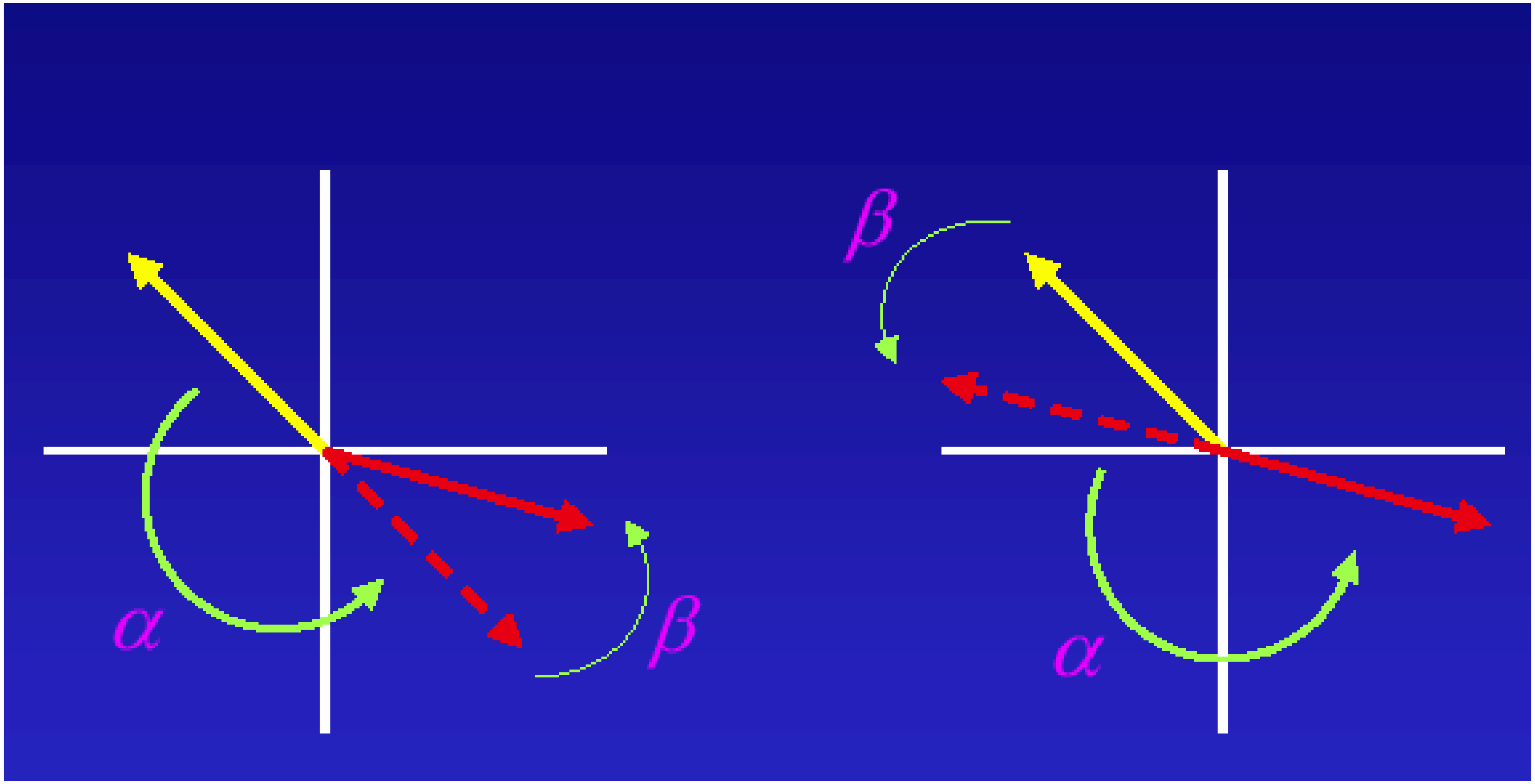
- **nieabelowa (nieprzemienna)**

kolejność wykonywania przekształceń składajacych się na daną symetrię odgrywa rolę

przykłady : obroty w przestrzeni
oddziaływania silne grupa SU(2) izospinu
grupa $SU(3)_{kolor}$
oddziaływania słabe grupa SU(2) słabego izospinu

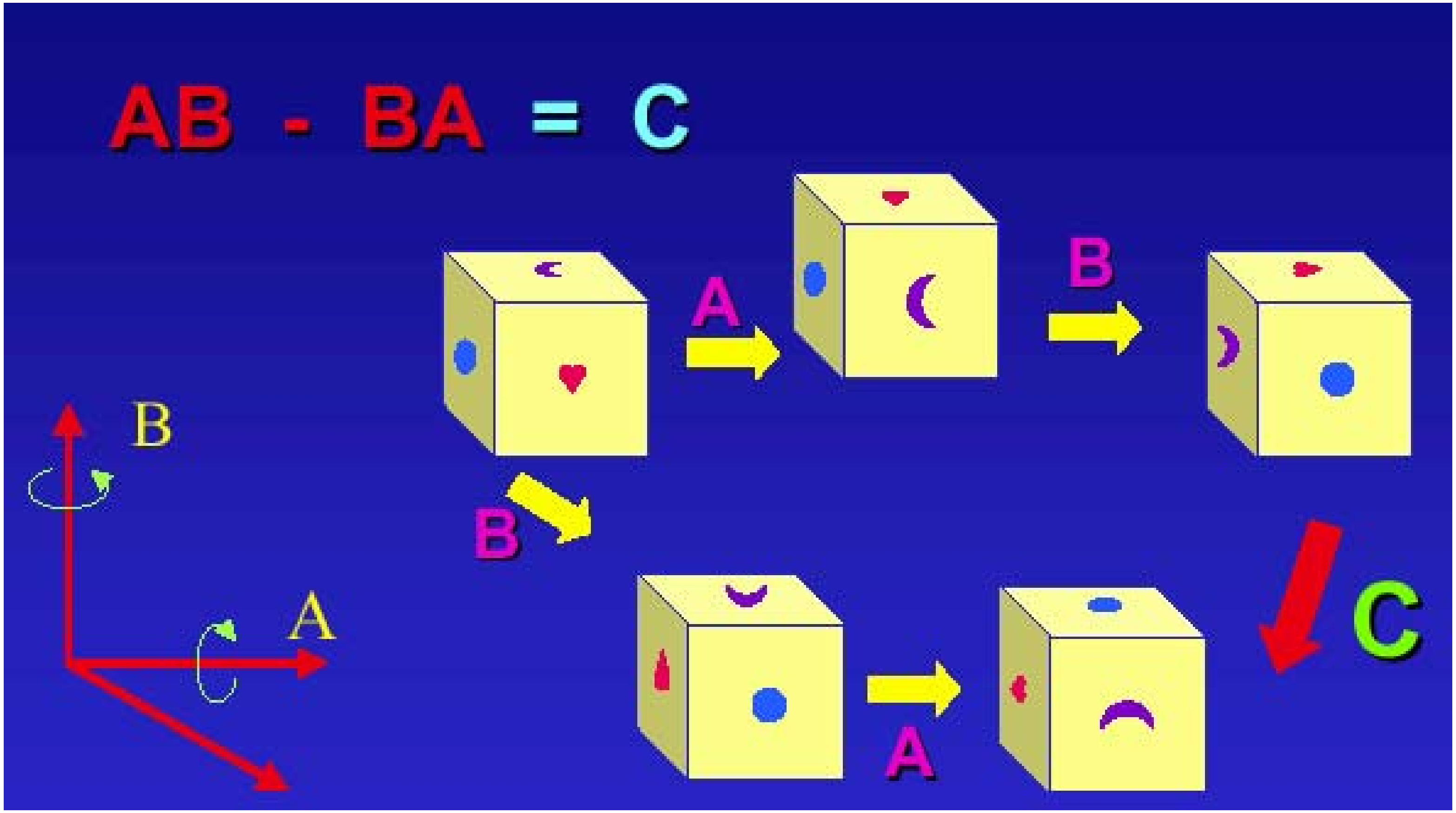
Symetria abelowa : grupa obrotów w płaszczyźnie

Kolejność wykonywania obrotów nie ma znaczenia



Symetria nieabelowa : grupa obrotów w przestrzeni

Kolejność wykonywania obrotów względem różnych osi ma znaczenie



Przykłady symetrii w fizyce cząstek

- **U(1)** **przemienna (abelowa) grupa cechowania w elektrodynamice kwantowej (QED)**
- **SO(1)** grupa obrotów wokół osi x $\longrightarrow$ **niezmienniczość prowadzi do zachowani krętu**
- **SU(2)** nieprzemienna (nieabelowa) grupa obrotów w przestrzeni spinu izotopwego (izospinu) – **symetria izospinowa oddziaływań silnych** $\longrightarrow$ **zachowanie izospinu**
- **SU(3)$_{zapach}$** grupa obrotów w przestrzeni zapachów
  symetria oddziaływań silnych dla lekkich kwarków u, d i s
  klasyfikacja hadronów – multiplety grupy SU(3)$_{zapach}$
- **SU(3)$_{kolor}$** **nieabelowa grupa przekształceń** w abstrakcyjnej przestrzeni koloru w **QCD**
  oddziaływania międzykwarkowe są niezmiennicze względem zamiany koloru

Symetria zapachowa oddziaływań silnych

$SU(2)_{izospin}$ oddziaływania silne nie są czułe na zapach kwarków $SU(3)_{zapach}$

- $m_u \approx m_d$ → przybliżona symetria zapachowa oddziaływań silnych tzn. zamiana u ↔ d nie ma znaczenia

- kwarki u i d – dwa stany tej samej cząstki

$$\psi(x) = \begin{pmatrix} u(x) \\ d(x) \end{pmatrix}$$

- niezmienniczość oddz. silnych dla zamiany u↔d – niezmienniczość względem obrotów w abstrakcyjnej przestrzeni izospinu

$$\begin{pmatrix} u' \\ d' \end{pmatrix} = \underset{SU(2)}{\hat{U}} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

grupa obrotów

> zachowana liczba kwantowa : izospin I

- multiplety izospinowe o krotności 2I +1

I = ½ proton, neutron

I = 1 mezony π^+, π^-, π^0

I = 3/2 bariony $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$

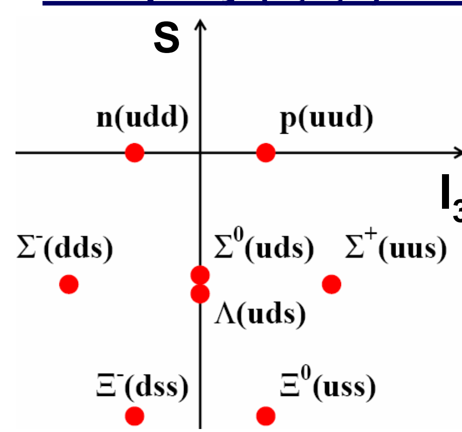
- SU(2) → SU(3) uogólnienie symetrii izospinowej przez Gell-Manna i Ne'emanna (odkrycie cząstek dziwnych → nowa liczba kwantowa dziwność)

- funkcja falowa cząstki występującej w 3 stanach różniących się zapachem

$$\psi(x) = \begin{pmatrix} u(x) \\ d(x) \\ s(x) \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} u' \\ d' \\ s' \end{pmatrix} = \underset{SU(3)}{\hat{U}} \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix}$$

- niezmienniczość oddz. silnych względem obrotów ψ(x) w przestrzeni zapachu

- multiplety (u,d,s) mezonów i barionów



multiplet barionów (qqq)

$J^P = ½^+$

Symetria (transformacja)		Zachowana wielkość (liczba kwantowa)
translacja w czasie	→	**energia**
przesunięcie w przestrzeni	→	**pęd**
obrót w przestrzeni	→	**moment pędu**
obrót w przestrzeni izospinu	→	**izospin I, I_3**
inwersja przestrzenna	→	**parzystość przestrzenna P**
sprzężenie cząstka-antycząstka	→	**parzystość ładunkowa C**
symetrie "przypadkowe" QED i QCD	→	**zapach kwarków** (zachowanie dziwności, powabu, piękna, liczby T)
symetria cechowania QED	→	**ładunek elektryczny**
?? zachowanie liczb barionowej i leptonowej automatycznie Wynika z Modelu Standardowego bezmasowe neutrina	→	**liczba barionowa, leptonowa** L_e, L_μ, L_τ
?? neutrina z masą		**globalna liczba leptonowa ??**

Większość odkrytych eksperymentalnie symetrii cząstek elementarnych jest "symetriami przypadkowymi" .

- **Symetrie przypadkowe QCD:**

  zachowanie parzystości przestrzennej, ładunkowej (oraz liczb kwantowych związanych z zapachem kwarków)
  Zachowanie dziwności, powabu, piękna i liczby T wynika ze struktury sprzężeń gluonów z kwarkami - emisja/absorpcja gluonu nie powoduje zmiany zapachu kwarka.

  Symetria izospinowa SU(2) i symetria $SU(3)_{zapach}$ są **naprawdę przypadkowymi** konsekwencjami b. małych mas kwarków u,d oraz s występujących w QCD.

- **Symetrie przypadkowe QED:**

  zachowanie parzystości przestrzennej i ładunkowej (oraz liczb kwantowych związanych z zapachem kwarków - emisja /absorpcja fotonu nie powoduje zmiany zapachu kwarka)

- **Zachowanie liczby barionowej i leptonowej** we wszystkich oddziaływaniach:

  Model Standardowy oparty na symetrii cechowania SU(3) x SU(2) x U(1) automatycznie zachowuje te liczby kwantowe , symetria przypadkowa ??

Symetria przypadkowa nie jest fundamentalną symetrią pola kwantowego.
Np. warunek renormalizowalności (procedura usuwania nieskończoności w obliczeniach) może spowodować, że efektywny lagranżjan teorii będzie niezmienniczy względem jednej lub więcej symetrii. Takie przypadkowe symetrie mogą być naruszane przez człony tłumione w efektywnym lagranżjanie, które mogą się okazać ważne przy b.dużych energiach.

Zachowanie ładunku elektrycznego

- **Skwantowanie ładunku** - ładunek elektryczny "obserwowanych" cząstek elementarnych jest wielokrotnością ładunku elementarnego (ładunku elektronu)

  $Q = n \cdot Q_{elektron}$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$ n – kwantowa liczba ładunkowa

  (ale ładunek kwarków jest ułamkowy)

- **Ładunek elektryczny jest zachowany we wszystkich oddziaływaniach:** silnych, elektromagnetycznych & słabych

  Z jaką symetrią związane jest prawo zachowanie ładunku elektrycznego ??

- **Doświadczalne ograniczenia** na niezachowanie ładunku :

ograniczenie na średni czas życia

$$\boxed{\tau\ (\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p}\nu_e\bar{\nu}_e) > 10^{18}\ lat}$$

Globalna symetria cechowania

Z jaką symetrią związane jest zachowanie ładunku elektrycznego ??

- **Lagranżjan dla relatywistycznej swobodnej cząstki o spinie ½ :**

$L = i\,\psi^*\gamma_\mu\partial^\mu\psi - m\psi^*\psi,\quad \partial^\mu \equiv \partial/\partial x_\mu\,,\ x_\mu$ – współrzędne czasoprzestrzenne

ψ – spinor Diraca, czteroskładnikowa funkcja falowa, γ_μ – macierze 4x4 , $\mu = 1,2,3,4$
(fermion i antyfermion z dwoma możliwymi stanami spinowymi)

→ **równanie Diraca w postaci kowariantnej :** $i(\gamma_\mu\partial^\mu - m)\psi = 0$

- **Wyniki fizyczne nie zależą od przekształcenia fazy funkcji falowej :**

$\psi \rightarrow \psi' = e^{i\omega}\cdot\psi\,,$ **globalna transformacja cechowania**

transformacja fazy niezależna od (**x**, t) czyli dla ω = const

► **Transformacje obrotu fazy o kąt ω : $U(\omega) = e^{i\omega}$ tworzą unitarną grupę abelową U(1)**

► **Lagranżjan jest niezmienniczy względem globalnej transformacji cechowania**

$L(\psi) = L(\psi')$

Globalna symetria cechowania

- Zgodnie z twierdzeniem Noether z taką **symetrią** związane jest **prawo zachowania** :

  Dla każdej ciągłej, jednoparametrowej symetrii lagranżjanu istnieje jeden zachowany prąd (J^μ)

$$J^\mu = \partial L / \partial (\partial_\mu \psi) \cdot \delta\psi \quad \longrightarrow \quad J^\mu = - \omega \, \psi^* \gamma_\mu \psi$$

relatywistyczna gęstośc prądu elektronu

zachowany ładunek elektryczny $Q(t) = \int d^3x J^0(t, x), \quad dQ/dt = 0$!!

Dirakowski ładunek elektryczny = całka przestrzenna z zerowej składowej dirakowskiego zachowanego prądu (operator, jego wartości własne = ładunki)

Zachowanie ładunku elektrycznego wynika z niezmienniczości względem globalnej transformacji cechowania

Lokalna symetria cechowania

- **Prawa fizyki powinny być niezmiennicze względem dowolnych lokalnych zmian fazy – lokalna symetria cechowania**

$$\boxed{\psi \longrightarrow \psi'' = e^{\,i\,\omega(x,\,t)}\psi}$$

kąt obrotu fazy $\omega(\mathbf{x}, t)$ zależny od p-tu w czasoprzestrzeni

- **Lagranżjan swobodnego elektronu nie jest niezmienniczy względem takiej transformacji lokalnej** $L(\psi) \neq L(\psi'')$
  (zawiera pochodne pola, które przekształcają się inaczej niż same pola)

- **Wprowadzenie pola wektorowego A_μ (pola cechowania)** opisującego bezmasowe cząstki z jednostkowym spinem ratuje niezmienniczość względem lokalnej symetrii cechowania

  ► **transformacja pola wektorowego**

$$\boxed{A_\mu \longrightarrow A_\mu' = A_\mu + 1/e\, \partial_\mu\, \omega}$$

+

  ► **zastąpienie w lagranżjanie pochodnej** $\partial\mu \equiv \partial / \partial x_\mu$ **przez pochodną kowariantną**

$$\boxed{\partial_\mu \longrightarrow D_\mu \equiv \partial_\mu - i\, e\, A_\mu}$$

e – ładunek elektronu

$\downarrow$

Lagranżjan jest niezmienniczy względem lokalnej transformacji cechowania

Lokalna symetria cechowania

- **niezmienniczość względem lokalnej zmiany fazy funkcji falowej swobodnego elektronu** → **istnienie dodatkowego pola cechowania A_μ**
- **to dodatkowe pole jest polem elektromagnetycznym, którego kwantem jest foton, bezmasowa cząstka o spinie jednostkowym**

$$F_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

tensor natężenia pola em.

$$A_\mu = (A_0 , -A)$$

czteropotencjał pola em.

$$\boxed{L = i\psi^*\gamma_\mu\partial^\mu\psi - e\psi^*\gamma_\mu A^\mu\psi - m_e\psi^*\psi - 1/4F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}}$$

energia kinetyczna elektronu	oddziaływanie elektron-foton	człon związany z masą elektronu	energia kinetyczna pola A_μ (fotonu)

↓

ładunki oddziałują z długozasięgowym polem elektromagnetycznym

Elektrodynamika kwantowa

kwantowa teoria pola opisująca oddziaływanie cząstek naładowanych elektrycznie poprzez wymianę fotonów, kwantów pola elektromagnetycznego

Dodanie do lagranżjanu członu masowego dla fotonu naruszałoby niezmienniczość teorii względem cechowania, konieczną też do zapewnienia renormalizowalności :

→ **bezmasowość fotonu wynika z lokalnej symetrii cechowania !!**

Zachowanie ładunku elektrycznego

liczba ładunkowa w stanie początkowym = liczba ładunkowa w stanie końcowym

$$\Sigma_i Q_i = \Sigma_f Q_f$$

$\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$ **oddziaływanie elektromagnetyczne**

Q : 0 +1 +1 0 (foton oddziałuje tylko elekromagnetycznie)

$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ **oddziaływanie silne**

(hadrony + zachowanie dziwności S, $K^0(d\bar{s})$, $\Lambda^0(\bar{d}s)$)

Q :	-1	+1	0	0
S :	0	0	+1	-1

$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ **rozpad słaby**

(dziwność nie jest zachowana)

Q :	0	+1	-1
S :	+1	0	0

Liczba barionowa

Rozpad protonu dozwolony przez prawo zachowania energii, ładunku elektrycznego, momentu pędu

$p \to e^+ \ \nu_e$ **??**

nie obserwujemy takiego rozpadu

Eksperyment :

stabilność swobodnego protonu

↓

prawo zachowania addytywnej liczby barionowej

(1939 Stückelberg, 1949 Wigner)

Doświadczalne ograniczenie na niezachowanie liczby barionowej :

$\tau\,(p \to e^+ \pi^0) > 5.0 \cdot 10^{33}$ **lat**

$\tau\,(n \to e^+ \pi^-) > 5.0 \cdot 10^{33}$ **lat**

Eksperyment Superkamiokande

Dolne ograniczenie na τ_p wynikajace z faktu istnienia zaawansowanych form życia na Ziemi : $\tau_p > 10^{16}$ **lat** (oszacowanie wieku Wszechświata $\sim 15 \cdot 10^9$ lat)

Bariony (qqq)	**B = +1**	**kwarki**	**B = +⅓**
Antybariony ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$)	**B = -1**	**antykwarki**	**B = - ⅓**
Wszystkie inne cząstki	**B = 0**	pozostałe cząstki fundamentalne	**B = 0**

B(proton) **= +1, B**(neutron) **= +1**

Zachowanie liczby barionowej

Teoria z lokalną symetria cechowania

→ **istnienie wielkości podlegającej absolutnemu prawu zachowania związane jest z istnieniem pola długozasięgowego oddziałującego z tą wielkością**

(np. zachowanie ładunku elektrycznego i pole elektromagnetyczne w QED)

Czy z liczbą barionową jest sprzężone jakieś pole długozasięgowe ?? Nie !

- Zasada równoważności ogólnej teorii względności : stosunek R masy grawitacyjnej do bezwładnej taki sam dla wszystkich substancji
- Pole sprzęgające się do liczby barionowej → modyfikacja siły oddziaływania grawitacyjnego → nieznaczne różnice R dla różnych materiałów
- Pomiar R w coraz bardziej precyzyjnych eksperymentach zapoczątkowanych przez Eötvösa w 1889 roku (poszukiwanie "piątej siły")
  $\Delta R / R < 10^{-12}$ → sprzężenie hipotetycznego pola do liczby barionowej o wiele słabsze niż oddziaływanie grawitacyjne **$G_{BARION} < G_{NEWTON} \cdot 10^{-9}$**

Liczba barionowa należy do klasy "ładunków" związanych jedynie z pewnymi prawami zachowania i tzw. symetriami globalnymi teorii. Natomiast ładunek elektryczny charakteryzuje elektromagnetyczne oddziaływania cząstek z nośnikami sił, fotonami.

Zachowanie liczby barionowej wynika automatycznie z Modelu Standardowego opartego na symetrii cechowania SU(3) x SU(2) x U(1)

Zachowanie liczby barionowej

Liczba barionowa jest zachowana we wszystkich oddziaływaniach: silnych, elektromagnetycznych & słabych

$$\Sigma_i B_i = \Sigma_f B_f \quad \leftrightarrow \quad N_q - N_{\bar{q}} = \text{const}$$

$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ — **oddziaływanie silne**

B : 0 1 0 1

$\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$ — **oddziaływanie elektromagnetyczne**

B : 0 1 0 1

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ — **słaby rozpad β**

B : 1 1 0 0

W Modelu Standardowym proton będący najlżejszym barionem nie może ulec rozpadowi

$p \not\rightarrow e^+ + \pi^0$

B: 1 0 0