

### Dziwność i parzystość

#### Cząstki dziwne

- Jeszcze w czasach, gdy źródłem rozprędzonych cząstek było jedynie promieniowanie kosmiczne, odkryto grupę cząstek, które dziwnie się prowadziły. Nazwano je cząstkami dziwnymi i przypisano im addytywny ładunek czy też liczbę kwantową dziwność. Dziwne mogą być zarówno mezony jak i bariony, przy czym dziwne bariony nazywane są hiperonami.
- Najlżejszymi mezonami dziwnymi są kaony  $K^0, K^+$  o masach 498 i 494 MeV i ich antycząstki  $\bar{K}^0, K^-$ . Umówiono się, że dziwność  $K^0, K^+$  wynosi  $s = 1$ , zaś  $\bar{K}^0, K^-$  równa jest  $s = -1$ .
- Do najlżejszych hiperonów należy  $\Lambda^0$  (lambda) o masie 1116 MeV i dziwności  $s = -1$ , trójka  $\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$  (sigma) o masach 1189, 1193, 1197 MeV i dziwności  $s = -1$  oraz para  $\Xi^0, \Xi^-$  (xi) o masach 1315 i 1321 MeV i dziwności  $s = -2$ .
- Zamieszanie z cząstkami dziwnymi brało się z faktu, że dziwność jest, jak dzisiaj wiemy, zachowywana w oddziaływaniach silnych, dzięki którym obserwowano produkcję cząstek dziwnych, naruszana jest natomiast w oddziaływaniach słabych odpowiedzialnych z rozpadu hiperonów i dziwnych mezonów.
- Pierwszym dokładnie przebadanym procesem, w którym pojawiają się cząstki dziwne, była reakcja zapisana we współczesnej notacji jako  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ . Działo się to Brookhaven National Laboratory w 1954 roku. Protony były bombardowane pionami ujemnymi przyspieszonymi w synchrotronie do energii 1,5 GeV. W efekcie zderzenia, za które odpowiedzialne są oddziaływania silne, powstawała para  $K^0, \Lambda^0$ . Zarówno dziwność stanu początkowego jak i końcowego wynosi zero, więc dziwność jest zachowywana w procesie  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ . Po czasie rzędu  $10^{-10}$  s następowały rozpady kaonu  $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$  i lambdy  $\Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p$  spowodowane oddziaływaniem słabym, w którym dziwność nie jest już zachowywana. Ostatecznie obserwowano więc reakcję.  
 $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^- + p$ .

## Wykład VII cd.

## Fizyka cząstek elementarnych

- Czas życia kaonu jest na tyle długi, że można było wytworzyć wtórną wiązkę kaonów i badać ich oddziaływania z protonami. W ten sposób odkryto 1953 roku w Berkeley hyperon  $\Xi^0$  obserwując reakcję  $K^- + p \rightarrow \Xi^0 + K^0$ , za którą odpowiedzialne są oddziaływania silne. Dziwność wynosząca  $s = -1$  w stanie początkowym i końcowym jest zachowana. Hyperon  $\Xi^0$  o dziwności  $s = -2$  nazywany jest kaskadą bowiem jego rozpad następuje w dwóch krokach. Najpierw mamy  $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ , a potem jeszcze rozpada się lambda.
- Kaskadowy charakter rozpadu  $\Xi^0$  wynika z faktu, że naruszenie zachowania dziwności w oddziaływaniach słabych następuje o jeden. Gdy zachodzi rozpad  $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ , dziwność zmienia wartość od  $s = -2$  do  $s = -1$ . Następnie rozpada się lambda  $\Lambda^0 \rightarrow N + \pi$  i następuje zmiana dziwności od  $s = -1$  do  $s = 0$ .
- Mnogość odkrytych hadronów wymagała znalezienia reguł porządkujących tą bogatą menażerię. Nim zajmiemy się rozważeniem owych reguł, wprowadzimy jeszcze jedną ważną charakterystykę cząstek.

### Parzystość

- Rozważmy, co dzieje się układem fizycznym, gdy dokonamy odbicia przestrzennego, czyli wektor położenia  $\mathbf{r}$  zamienimy na  $-\mathbf{r}$ . Innymi słowy dokonujemy transformacji  $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$ .
- Zauważmy, że przy odbiciu przestrzennym pęd  $\mathbf{p} \equiv m \frac{d\mathbf{r}}{dt}$  zmienia znak, a moment pędu  $\mathbf{L} \equiv \mathbf{r} \times \mathbf{p}$  znaku nie zmienia.
- Podziałajmy operatorem odbicia przestrzennego  $P$  na funkcję falową  $\psi(t, \mathbf{r})$

$$P\psi(t, \mathbf{r}) = \psi(t, -\mathbf{r}).$$

Zwróćmy uwagę, że

$$P^2\psi(t, \mathbf{r}) = \psi(t, \mathbf{r}).$$

A zatem, jeśli funkcja  $\psi(t, \mathbf{r})$  jest wektorem własnym operatora  $P$ , to odpowiadająca jej wartość własna, czyli właśnie parzystość, wynosi  $\pm 1$ .

- Parzystość jest multiplikatywna liczbą kwantową tzn. jeśli układ składa się z dwóch części, to parzystość całości jest iloczynem parzystości części.

## Wykład VII cd.

## Fizyka cząstek elementarnych

- Przyjmijmy, że funkcja falowa  $\psi(t, \mathbf{r})$  jest stanem własnym  $P$ , tzn. ma określoną parzystość. Jeśli hamiltonian, o którym zakładamy, że nie zależy jawnie od czasu, nie ulega zmianie przy odbiciu przestrzennym tzn.  $H(\mathbf{r}) = H(-\mathbf{r})$  i komutuje z operatorem  $P$ , to parzystość jest zachowywana.
- Parzystość jest zachowywana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych, naruszana jest natomiast w oddziaływaniach słabych.
- Przyjmijmy, że  $\psi(\mathbf{r})$  opisuje ruch względny układu dwucząstkowego, w którym występuje sferycznie symetryczny potencjał oddziaływana. Kątowa zależność funkcji falowej dana jest wówczas harmoniką sferyczną  $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ , a odbicie przestrzenne zmienia kąt zenitalny  $\theta$  i azymutalny  $\varphi$  następująco:

$$\theta \rightarrow \pi - \theta, \quad \varphi \rightarrow \pi + \varphi.$$

Jak pamiętamy,  $\theta \in [0, \pi]$ ,  $\varphi \in [0, 2\pi]$ . Zachodzi relacja

$$Y_{lm}(\pi - \theta, \varphi + \pi) = (-1)^l Y_{lm}(\theta, \varphi),$$

a zatem

$$\psi(-\mathbf{r}) = (-1)^l \psi(\mathbf{r}),$$

czyli parzystość równa jest  $(-1)^l$ .

- Aby określić parzystość fotonu, rozważmy, co się dzieje ze statycznym polem elektromagnetycznym pod działaniem operatora odbicia przestrzennego. Mamy zatem układ ładunków i prądów opisanych gęstością ładunku  $\rho(\mathbf{r})$  i prądu  $\mathbf{j}(\mathbf{r})$ . Zauważmy, że

$$P\rho(\mathbf{r}) = \rho(-\mathbf{r}) = \rho(\mathbf{r}), \quad P\mathbf{j}(\mathbf{r}) = \mathbf{j}(-\mathbf{r}) = -\mathbf{j}(\mathbf{r}),$$

czyli gęstość ładunku nie zmienia znaku – ma parzystość dodatnią, natomiast prąd zmienia znak – ma parzystość ujemną. W cechowaniu Coulomba ( $\nabla \cdot \mathbf{A}(\mathbf{r}) = 0$ ) potencjał skalarny  $V(\mathbf{r})$  i wektorowy  $\mathbf{A}(\mathbf{r})$  dane są wzorami

$$V(\mathbf{r}) = \int \frac{d^3 r' \rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, \quad \mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int \frac{d^3 r' \mathbf{j}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}.$$

Widzimy, że

$$PV(\mathbf{r}) = V(-\mathbf{r}) = V(\mathbf{r}), \quad P\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mathbf{A}(-\mathbf{r}) = -\mathbf{A}(\mathbf{r}).$$

Dalej stwierdzamy, że pole elektryczne  $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla V(\mathbf{r}) + \dot{\mathbf{A}}(\mathbf{r})$  zmienia znak przy odbiciu przestrzennym, natomiast pole magnetyczne  $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r})$  nie zmienia znaku.

## Wykład VII cd.

## Fizyka cząstek elementarnych

- Czteropotencjał  $A^\mu(x) \equiv (A^0(x), \mathbf{A}(x))$ , gdzie  $x^\mu = (t, \mathbf{r})$ , transformuje następująco

$$PA^\mu(x) = A^\mu(t, -\mathbf{r}) = (A^0(x), -\mathbf{A}(x)),$$

tzn. składowa czasowa nie ulega zmianie przy odbiciu przestrzennym, a przestrzenna składowa zmienia znak. Podobnie, jak już wiemy, transformują się czterowektory pędu i prądu.

- Foton, mający spin jednostkowy i opisywany czteropotencjałem  $A^\mu(x)$ , ma parzystość ujemną i nazywany jest cząstką wektorową.
- Mezony o spinie jednostkowym i dodatniej parzystości określane są jako pseudowektory.
- Mezony o zerowym spinie i dodatniej parzystości są skalarami.
- Parzystość pionów, które mają spin zerowy, jest ujemna i dlatego określane są jako pseudoskalary.
- Parzystość fermionów nie ma sensu absolutnego (co wynika ze szczególnych własności spinorów przy obrotach), można natomiast określić parzystość względną jednego fermionu względem drugiego. Przyjęto, że parzystość elektronu, protonu i lambdy jest dodatnia, a to pozwoliło określić parzystość innych fermionów.
- Wykonując odpowiednie pomiary, ustala się spin i parzystość hadronów. Te dwie wielkości zapisuje się zwykle jako  $J^P$ , gdzie  $J$  jest spinem, a  $P$  parzystością. Tak na przykład dla mezonów pseudoskalarnych, do których należą piony, mamy  $0^-$ , a dla mezonów wektorowych  $1^-$ .