

Wykład 43

Cząstki elementarne - przedłużenie

Hadrony

Cząstki elementarne oddziałujące silnie nazywają *hadronami* (nazwa hadron oznacza "wielki", "masywny"). Hadrony są podzielony na dwie grupy: *mezony* i *bariony*.

1) *Mezony* to są cząstki o zerowym spinie (czyli to są bozony). Do grupy mezonów należą:

$$\begin{aligned} \text{piony: } & \pi^+ , \pi^0 , \pi^- , \\ \text{kaony: } & K^+ , K^- , K^0 , \bar{K}^0 , \\ \text{mezon: } & \eta^0 . \end{aligned}$$

Mezony są cząstkami niestabilnymi i przechodzą w leptony: elektrony albo pozytony.

Na początku rozwoju fizyki jądrowej zakładali, że właśnie mezony są kwantami pola silnego oddziaływania. Według Tamma i Yukawy oddziaływanie między nukleonami zachodzi za pomocą wymiany wirtualnymi mezonami , tj. cząstek energia (masa) których powstaje z "naruszenia" zasady zachowania energii

$$\Delta E \Delta t \approx h .$$

Wszystkie mezony posiadają masę spoczynkową $m_0 = (200 - 1000) m_e$. Wśród mezonów zadziwiające własności mają *kaony*. Już mówiliśmy, że w procesach z kaonami było wykryto niezachowanie parzystości kombinowanej. Analiza istniejących procesów z udziałem kaonów doprowadziła do wniosku o konieczności wprowadzenia dla kaonów, a również hiperonów nowej liczby kwantowej S , którą nazywali na początku "*dziwnością*".

2) *Bariony*. W rozdział barionów wchodzi nukleony - proton (antyproton) i neutron (antyneutron) oraz hiperony - niestabilne cząstki masa których jest większa niż masa nukleonów:

$$\Lambda , \Sigma^+ , \Sigma^0 , \Sigma^- , \Xi^0 , \Xi^- , \Omega^- .$$

W rozdział barionów wchodzi również *antyhiperony*. Wszystkie hiperony oraz neutron są cząstkami niestabilnymi i przechodzą z czasem w proton.

Analiza procesów rozpadu barionów wykazała, że przy rozpadzie barionu zawsze, oprócz innych cząstek, powstaje barion. Na przykład

$$n \rightarrow p + e^{-} + \tilde{\nu}_e ,$$

$$\Sigma^{+} \rightarrow p + \pi^{0} ,$$

$$\Xi^{-} \rightarrow \Lambda^{0} + \pi^{-} .$$

Jeżeli każdemu barionowi przypisać ładunek barionowy $B = +1$, a antybarionowi - ładunek $B = -1$, to zasadę zachowania liczby barionów można sformułować jako *zasadę zachowania ładunku barionowego*. Zgodnie z zasadą zachowania ładunku barionowego, proces

$$p \rightarrow e^{+} + \nu_e$$

nie może istnieć w przyrodzie.

Izospinowe multiplety

Z symetrii ładunkowej sił jądrowych (*siły jądrowe nie zależą od elektrycznego ładunku cząstek*) wynika, że rozdzielenie nukleonów na protony i neutrony powodują siły elektromagnetyczne. Bariony też można podzielić na grupy - tak zwane *izospinowe multiplety*. W jednej grupie izospinowej cząstki, względem silnych oddziaływań, są takimi samymi cząstkami. Rozdzielenie cząstek w grupie zachodzi wskutek uwzględnienia słabszego, w porównaniu z silnym, oddziaływania elektromagnetycznego. Na przykład, piony $\pi^{+}, \pi^{0}, \pi^{-}$ w procesach za które odpowiedzialne jest oddziaływanie silne, zachowują się w podobny sposób. Trzy piony, zgodnie z formalizmem izospinowym, są różnymi rzutami wektora izospinowego $\vec{\tau}$. Liczbę rzutów wektora $\vec{\tau}$ definiuje, tak samo jak w przypadku zwykłego spinu (albo momentu pędu), wzór

$$N = 2\tau + 1 ,$$

gdzie N - liczba cząstek w izospinowym multiplicie. Dla pionów $N = 3$, a więc $\tau = (N - 1)/2 = 1$ i π^{+} - pion odpowiada rzutowi $\tau_3 = 1$, π^{0} - pion - rzutowi $\tau_3 = 0$, π^{-} - pion odpowiada rzutowi $\tau_3 = -1$.

Istnieją cząstki, na przykład η^{0} - mezon oraz Ω^{-} - hiperon, dla których $\tau = 0$ (synglety izospinowe).

Wzór Gell-Manna i Nishijimy. Hiperładunek

K -mezony oraz hiperony mają w jednych procesach własności charakterystyczne dla cząstek oddziałujących silnie, a w innych - jako cząstki oddziałujące słabo. Z analizy procesów

zachodzących z K - mezonami i hiperonami wynikało, że liczba tych cząstek jest zachowaną i jeżeli powstają nowe hiperony (albo mezony) to zawsze parami. Jeżeli przypisać tym dziwnym cząstkom (kaonom i hiperonom) nową liczbę kwantową S - "dziwność", to zasadę zachowania liczby hiperonów i kaonów można sformułować jako zasadę zachowania dziwności S .

W latach 1953-1954 Gell-Mann oraz Nishijima zauważyły, że dla silnie oddziałujących cząstek, ładunki: elektryczny Q (w jednostkach $|e|$ - ładunku elektronu), barionowy B , dziwność S oraz rzut izospinowy τ_3 , spełniają relację:

$$Q = \tau_3 + \frac{B+S}{2} .$$

Wzór ten nosi nazwę wzoru Gell-Manna - Nishijimy. Sprawdźmy ten wzór:

$$\begin{aligned} K^+ \rightarrow +1 &= \frac{1}{2} + \frac{0+1}{2} \rightarrow S = 1 \\ K^- \rightarrow -1 &= -\frac{1}{2} + \frac{0-1}{2} \rightarrow S = -1 \end{aligned} ,$$

$$\begin{aligned} \pi^+ \rightarrow +1 &= +1 + \frac{0+0}{2} \rightarrow S = 0 & \Xi^0 \rightarrow 0 &= \frac{1}{2} + \frac{1-2}{2} \rightarrow S = -2 \\ \pi^0 \rightarrow 0 &= 0 + \frac{0+0}{2} \rightarrow S = 0 , & \Xi^- \rightarrow -1 &= -\frac{1}{2} + \frac{1-2}{2} \rightarrow S = -2 . \\ \pi^- \rightarrow -1 &= -1 + \frac{0+0}{2} \rightarrow S = 0 & \Omega^- \rightarrow -1 &= 0 + \frac{1-3}{2} \rightarrow S = -3 \end{aligned}$$

Zgodnie ze wzorem Gell-Manna - Nishijimy bariony, które w odróżnieniu od pionów i kaonów mają połówkowe spiny (tj. są fermionami), możemy przedstawić w postaci schematu przedstawionego niżej.

W słabych oddziaływaniach "dziwność" S nie jest zachowana, a więc proces

$$\begin{aligned} \Omega^- &\rightarrow \Xi^0 + \pi^- \\ S : -3 &\neq -2 + 0 \end{aligned} ,$$

który istnieje w przyrodzie zachodzi wskutek oddziaływań słabych. Procesy

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$$

$$S: -2 \neq -1 + 0$$

$$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$$

$$S: -2 \neq -1 + 0$$

oraz

$$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0 \quad S: -1 \neq 0 + 0$$

$$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^- \quad S: -1 \neq 0 + 0$$

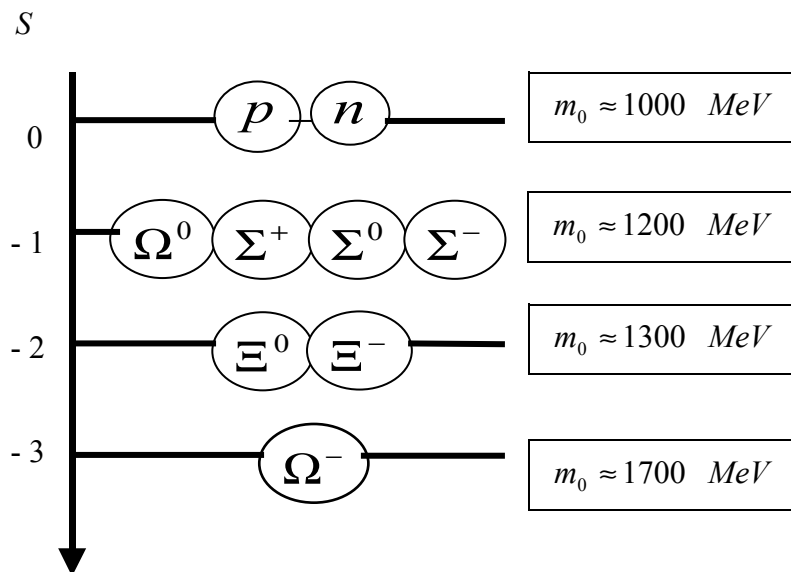
również zachodzą wskutek działania sił słabych.

Natomiast proces

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$$

$$S: 0 = 0 + 0$$

jest procesem elektromagnetycznym.



Późniejszy rozwój techniki fizyki wysokich energii wykazał, że dla opisu zachowania niektórych wykrytych mezonów musimy, oprócz ładunków Q i S , wprowadzić nowe ładunki:

C i T . Sumę wszystkich, oprócz Q , ładunków ($B+S+C+T$) nazywają hiperładunkiem Y . Przez hiperładunek wzór Gell-Manna - Nishijimy możemy zapisać w postaci

$$Q = \tau_3 + \frac{Y}{2}.$$

Kwarki i gluony. Budowa hadronów w modelu kwarkowym. Kwantowa chromodynamika

W 1964 roku niezależnie Gell-Mann i Zweig wysunęli hipotezę, że wszystkie oddziałujące silnie cząstki są zbudowane z trzech cząstek - *kwarków*. Kwarki mają ułamkowe liczby kwantowe (ładunki):

Rodzaj kwarka	Elektryczny ładunek Q	Barionowy ładunek B	Dziwność S	Spin	liczba izospinowa τ_3
u	+ 2/3	+ 1/3	0	1/2	+ 1/2
d	- 1/3	+ 1/3	0	1/2	- 1/2
s	- 1/3	+ 1/3	- 1	1/2	0

Antykwarki $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{s}$ mają przeciwne (do kwarków) ładunki. Budowa hadronów w modelu kwarkowym jest przedstawiona w tablicy niżej. Z tej tablicy widać, że cząstka Ω^- hiperon jest zbudowana z trzech kwarków s , które mają takie same rzuty spinów. Jednak kwarki są fermionami i zgodnie z zasadą wykluczenia Pauliego w jednym stanie nie mogą być dwie (albo więcej) identyczne cząstki. Trudność ta została przezwyciężona wprowadzeniem nowej liczby kwantowej - *koloru*. Każdy kwark danego typu może występować w trzech różnych kolorach: czerwonym, zielonym i niebieskim. Oczywiście nie ma to nic wspólnego ze zwyczajnymi kolorami. Są to wyłącznie nazwy służące do oznaczenia rozmaitych odmian kwarków. Wszystkie fizycznie obserwowane stany są pozbawione "koloru", czyli są "białymi".

Więc hadrony zbudowane są z trzech kwarków różnego koloru, co w sumie musi dać kolor "biały". Antykwarki posiadają antykolory, takie, że przy odpowiednich kolorach suma - kwark + antykwark, posiada kolor "biały". Oddziaływanie między kwarkami zachodzi wskutek wymiany kwantów pola, które nazywają *gluonami* (co znaczy - klej). Gluony też są kolorowe. Nowoczesna teoria silnych oddziaływań, chromodynamika kwantowa, to jest właśnie teoria oddziaływań kolorowych kwarków i gluonów.

W 1974 roku dwie grupy w USA kierowane przez B.Richtera i S.Tinga niezależnie odkryły cząstkę, którą nazwali odpowiednio Ψ i J . Własności tej J/Ψ cząstki jasno dowodzą,

że składa się ona z nowego, czwartego kwarku c i jego antykwarku \tilde{c} . Kwark c posiada nowy ładunek $C = +1$ ("czarowość" - od ang. "charmed") i ma ładunki:

kwark	Q	I	B	S	C
c	$+2/3$	$1/2$	$1/3$	0	$+1$

Cząstka J/ψ nie jest "czarowaną" ($C = 0$). Jednak w 1976 roku były wykryte mezony D i F które mają czarowość $C \neq 0$:

$$D^0 \rightarrow cu ; D^+ \rightarrow cd ; F^+ \rightarrow cs .$$

Budowa hadronów w modelu kwarkowym

Cząstki	Q	B	S	I	τ_3
$\pi^+ = u\tilde{d}$	+1	0	0	$\uparrow\downarrow = 0$	+1
$\pi^0 = u\tilde{u}, d\tilde{d}$	0	0	0	$\uparrow\downarrow = 0$	0
$\pi^- = \tilde{u}d$	-1	0	0	$\uparrow\downarrow = 0$	-1
$K^0 = d\tilde{s}$	0	0	1	$\uparrow\downarrow = 0$	-1/2
$\tilde{K} = u\tilde{s}$	+1	0	1	$\uparrow\downarrow = 0$	+1/2
$\eta^0 = s\tilde{s}$	0	0	0	$\uparrow\downarrow = 0$	0
$p = uud$	+1	+1	0	$\uparrow\downarrow\uparrow = 1/2$	+1/2
$n = udd$	0	+1	0	$\uparrow\downarrow\uparrow = 1/2$	-1/2
$\Lambda^0 = uds$	0	+1	-1	$\uparrow\downarrow\uparrow = 1/2$	0
$\Sigma^+ = uus$	+1	+1	-1	$\uparrow\downarrow\uparrow = 1/2$	1
$\Sigma^0 = uds$	0	+1	-1	$\uparrow\downarrow\uparrow = 1/2$	0
$\Sigma^- = dds$	-1	+1	-1	$\uparrow\downarrow\uparrow = 1/2$	-1
$\Xi^- = dss$	-1	+1	-2	$\uparrow\downarrow\uparrow = 1/2$	-1/2
$\Omega^- = sss$	-1	+1	-3	$\uparrow\uparrow\uparrow = 3/2$	0

W 1976 roku została odkryta nowa cząstka Υ (ipsilon). Własności tej cząstki dowodzą, że zbudowana ona z nowego kwarku b i jego antykwarku \tilde{b} . Kwark b posiada nowy ładunek b - śliczność (od ang. beauty). "Śliczny" kwark b posiada ładunki:

kwark	Q	I	B	S	C	b
<i>b</i>	- 1/3	1/2	1/3	0	0	1

Obecnie istnieją dowody, że w przyrodzie musi istnieć szósty kwark *t*. Kwark ten posiada nowy ładunek *t* ("prawdziwość" - od angl. "truth"). "Prawdziwy" kwark musi posiadać ładunki:

Kwark	Q	I	B	S	C	b	t
<i>t</i>	+ 2/3	½	1/3	0	0	0	1

Z teorii kwarków i gluonów - kwantowej chromodynamiki, wynika, że niemożliwe są procesy, które doprowadziłyby do uwolnienia wyizolowanego kwarku. Kwantowa chromodynamika posiada szczególną własność zwaną "swobodą asymptotyczną", polegającą na tym, że wraz ze wzrostem energii słabną oddziaływania między cząstkami. Takie słabnięcie oddziaływań zaobserwowano w doświadczeniach z wysokoenergetycznym rozpraszaniem cząstek jeszcze w 1967 roku, ale tylko w 1973 roku udało się zrozumieć skąd to zjawisko pochodzi. Obecnie sądzimy, że jeśli na przykład ktoś spróbowałby rozerwać mezon (cząstkę złożoną z pary kwark - antykwark), to w miarę wzrostu odległości między kwarkiem i antykwarkiem wzrastałaby siła między nimi, aż wreszcie wysiłek związany z dalszym zwiększaniem odległości wymagałby takiej energii, iż możliwa stałaby się kreacja nowej pary kwark-antykwark z próżni. Nowy kwark dołącza się do starego antykwarku, a nowy antykwark do starego kwarku i w ten sposób powstają dwa mezony. Ten proces możemy porównać do prób rozerwania struny: po rozerwaniu struny znów dostajemy dwie struny.

Teorii wielkiej unifikacji. Spontaniczny rozpad protonu. Teorii strun

Sukces, jakim było ujednoczenie oddziaływań słabych i elektromagnetycznych, skłonił wielu fizyków do podjęcia podobnych prób połączenia elektroslabych sił z silnymi oddziaływaniami w ramach jednej *teorii wielkiej unifikacji* (TWU). Podstawowa idea TWU jest prosta. Jak już wiemy, oddziaływania silne słabną wraz ze wzrostem energii. Z drugiej strony oddziaływania słabe i elektromagnetyczne, które nie są asymptotycznie swobodne, stają się coraz mocniejsze, gdy rośnie energia. Przy pewnej, bardzo wysokiej energii, zwanej *energiją wielkiej unifikacji*, wszystkie trzy siły mają jednakową wielkość i wtedy można uważać je za różne przejawy tej samej siły. W tym zakresie energii znika również różnica między kwarkami i leptonami. Wielkość energii unifikacji nie jest dobrze znana, ale prawdopodobnie jest ona rzędu

10^9 GeV . Współczesne akceleratory umożliwiają badanie zderzeń między cząstkami o energii mniej niż 10^3 GeV i bezpośrednie sprawdzenie teorii unifikacji w laboratorium nie jest możliwe (akcelerator o energii równej energii wielkiej unifikacji musiałby mieć rozmiary Układu Słonecznego). Jednak jak w przypadku teorii elektroslabej, można badać konsekwencje takiej teorii dla zjawisk w niskich energiach. Spośród tych konsekwencji najbardziej interesujący jest wniosek, że protony, który tworzą znaczną część całkowitej masy zwykłej materii, mogą spontanicznie rozpadać się na lżejsze cząstki, takie jak pozytony. Dzieje się tak, ponieważ przy energii wielkiej unifikacji nie ma istotnej różnicy między kwarkami i leptonami. Przy zmniejszeniu energii maleje prawdopodobieństwo spontanicznego rozpadu protonu i przy zwykłych warunkach (energiach), które istnieją na Ziemi, prawdopodobieństwo rozpadu protonu jest tak małe, że na rozpad poszczególnych protonów należałoby czekać co najmniej 10^{31} lat. Jest to czas znacznie dłuższy niż ten, który upłynął od Wielkiego Wybuchu (około $13 \cdot 10^9$ lat). Można by zatem sądzić, że możliwości spontanicznego rozpadu protonu nie daje się sprawdzić doświadczalnie. Szanse detekcji rozpadu można jednak zwiększyć, obserwując jednocześnie wszystkie protony w dużej ilości materii. Sto ton wody zawiera mniej więcej 10^{31} protonów, a zatem gdyby proton naprawdę byłby niestabilnym, to w zbiorniku zawierającym sto ton wody powinien w ciągu roku rozpaść się jeden proton. Doświadczalne próby zaobserwowania rozpadu protonu trwają już wiele lat i jak dotychczas nie przyniosły sukcesu, ale w niedalekiej przyszłości w Japonii powstanie nowe urządzenie umożliwiające stałą obserwację 10 000 ton wody w poszukiwaniu słabych błysków światła, sygnalizujących rozpad protonu. Być może w tym eksperymencie uda się coś zaobserwować.

Oprócz elektroslabych i silnych oddziaływań istnieje najsłabsze oddziaływanie - grawitacyjne. Teorii wielkiej unifikacji mówią, że elektromagnetyczne, słabe i silne oddziaływania powstały z jednego pola, wskutek spontanicznego łamania symetrii. Najpierw przy energiach rzędu 10^9 GeV powstają leptony i kwarki oraz pole silne i pole elektroslabe. Następnie przy energiach rzędu 100 GeV zachodzi "rozdzielenie" elektroslabego pola na pole elektromagnetyczne i pole słabe.

Obecnie wielu fizyków są przekonane, że musi istnieć jednolita teoria fizyczna wszystkich oddziaływań i cząstek - ostateczna teoria. Zgodnie z tą teorią, opracowaną nie do końca, przy energiach rzędu 10^{19} GeV (energia Plancka) stała sprzężenia grawitacyjnego staje taką samą jak stałe pozostałych oddziaływań. Przy takich energiach znika różnica między wszystkimi polami i cząstkami. Warunki takie mogły istnieć w bardzo wczesnym stadium istnienia Wszechświata.

W teorii elektrosłabej i kwantowej chromodynamice wszystkie cząstki są punktowymi cząstkami (posiadają zerowe wymiary). W ostatnie lata gwałtownie wzrosło zainteresowanie teoriami tzw. *strun*. Teoria strun powstała pod koniec lat sześćdziesiątych i miała stanowić teorię silnych oddziaływań. Pomysł tej teorii polega na próbie opisu cząstek, takich jak proton i neutron, jako fal na strunie. Podstawowymi obiektami w teorii strun nie są cząstki zajmujące pojedyncze punkty w przestrzeni, lecz jednowymiarowe obiekty, które mają tylko długość (pozbawione są innych wymiarów). Przypominają one nieskończenie cienkie kawałki strun. Struny mogą mieć swobodne końce (otwarte struny) lub mogą tworzyć pętle (zamknięte struny). Pojedyncza struna może podzielić się na dwie, albo połączyć końce. Emisja lub absorpcja jednej cząstki przez drugą odpowiada rozdzieleniu lub połączeniu końców strun. Poruszając się w przestrzeni struny wibrują. Każda struna może znajdować się w jednym z nieskończenie wielu możliwych stanów (modów) drgań. Drgania strun nie są gasnącymi. Każdemu drganiu struny odpowiada cząstka i z odległości obserwujemy taką strunę jako punktową cząstką. Z teorii strun wynika, że wszystkie znane cząstki - kwarki, gluony, fotony, leptony - należy utożsamić z drganiami strun o najmniejszej energii i zwiększenie energii drgań (energii procesów) doprowadzi do powstawania nowych cząstek elementarnych. W tym poglądzie nie ma granicy na liczbę cząstek elementarnych. Jednak charakterystyki nowych cząstek można będzie przewidywać. Przypuszczają, że teoria strun to obecnie jedyna kandydatka na teorię ostateczną.