

## Wykład 15

---

### Elementy fizyki cząstek elementarnych

---

#### Klasyfikacja cząstek elementarnych

*Cząstkami elementarnymi* będziemy nazywać takie cząstki, których struktury wewnętrznej nie możemy (lub jeszcze nie umiemy przy współczesnym stanie wiedzy) do końca opisać, zakładając, iż są one prostym połączeniem lub kombinacją innych cząstek. Cząstki elementarne możemy podzielić na cztery grupy, zgodnie z oddziaływaniami w których te cząstki występują.

- Pierwsza grupa zawiera jedną cząstkę -  $\gamma$  kwant. Gamma kwanty są kwantami pola elektromagnetycznego i występuje tylko w elektromagnitnych oddziaływaniach. Elektromagnitne oddziaływania charakteryzuje stała oddziaływania (stała sprzężenia elektromagnetycznego)  $e^2 / hc$  (stała subtelnej struktury) która jest równa  $1/135 \approx 10^{-2}$ . Gamma kwant jest bozonem, ze spinem  $I = 1$ . Elektromagnetyczne oddziaływania mają zasięg równy nieskończoności.
- Druga grupa zawiera też tylko jedną cząstkę - grawiton. Grawiton jest kwantem pola grawitacyjnego i jest bozonem ze spinem  $I = 2$ . Do obecnych czasów ta cząstka jeszcze nie została wykryta doświadczalnie. Stała sprzężenia oddziaływania grawitacyjnego jest rzędu  $10^{-39}$ . A więc w porównaniu z innymi oddziaływaniami, oddziaływanie grawitacyjne jest najsłabszym i występuje realnie tylko dla ciał o dużej masie. Jak i oddziaływania elektromagnetyczne, grawitacyjne oddziaływania mają zasięg równy nieskończoności.
- Trzecia grupa zawiera sześć cząstek, które nazywają *leptonami* (tj. lekkimi cząstkami). Do tej grupy należą: elektron ( $e^-$ ) i dwa "częszkich elektrony" - mion  $\mu$  i mion  $\tau$ ; oprócz tego do tej grupy należą trzy odpowiednich neutrina - neutrino elektronowe  $\nu_e$ , neutrino mionowe  $\nu_\mu$  oraz tau-neutrino  $\nu_\tau$ . Wszystkie leptony są fermionami i mają spin  $I = 1/2$ . Głównym oddziaływaniem w którym występują te cząstki są oddziaływania słabe, tj. oddziaływania które są odpowiedzialne za beta rozpad i inne rozpady, z udziałem neutrina. Oddziaływanie słabe charakteryzuje się odpowiednią stałą sprzężenia, która jest rzędu  $10^{-14}$ . Wic oddziaływanie słabe jest słabszym, niż oddziaływanie elektromagnetyczne. Kwantami pola słabego są trzy bozony:

$Z^0, W^-, W^+$ . Leptony mające ładunek elektryczny oddziałują wzajemnie również za pomocą oddziaływania elektromagnetycznego. Zasięg sił słabych jest mniejszym niż  $10^{-13}$  cm.

- Czwarta grupa zawiera wielu cząstek, które nazywają *hadronami*. Głównym oddziaływaniem dla hadronów jest silne oddziaływanie, stała sprzężenia którego jest 10. Silne oddziaływanie jest największym oddziaływaniem w przyrodzie. Zasięg silnych oddziaływań wynosi  $\sim 10^{-13}$  cm. Wszystkie hadrony są zbudowane z kwarków, które są istotnie elementarnymi cząstkami. Kwantami pola oddziaływania kwarków są gluony. Hadrony dzielą na trzy podgrupy: *mezony, bariony i hiperony*.

Oprócz leptonów i hadronów istnieje liczna grupa cząstek krótkotrwałych (czas życia  $\tau \approx 10^{-23}$  sek). Tych cząstek około 200, które nazywają *rezonansami*. Rezonanse utworzone przez dwie lub większą liczbę cząstek elementarnych i oddziałują z innymi cząstkami za pomocą silnych oddziaływań.

Ze wszystkich cząstek elementarnych na dzień dzisiejszy za stabilne uważane są tylko dwie cząstki: elektron i proton. Pozostałe cząstki są niestabilnymi i po upływie czasu przechodzą w elektrony, albo protony.

### **Cząstki i antycząstki. Zasada sprzężenia ładunkowego. Antymateria**

Z relatywistycznego równania Diraca, które opisuje relatywistyczną mechanikę kwantową, wynika, że oprócz elektronu musi istnieć cząstka, która różni się od elektronu ładunkiem, tj. musi posiadać dodatni ładunek. Masę, spin tej cząstki są takie same jakie posiada elektron. Cząstka ta - *pozyton* była wykryta w promieniowaniu kosmicznym w 1932 roku. Elektron i pozyton nazwano odpowiednio cząstka i antycząstką. Na przykładzie elektronu i pozytonu dowiedziono, że przyroda jest symetryczna względem cząstek i antycząstek. Pojęcie antycząstki uogólniono następnie na inne cząstki, zarówno fermiony, jak i bozony.

Symetria przyrody przejawiająca się w istnieniu cząstek i antycząstek i oznaczająca symetrię względem zamiany ładunku cząstki jest związana z *zasadą sprzężenia ładunkowego*. Zgodnie z tą zasadą, wszystkie zjawiska fizyczne nie ulegają zmianie jeżeli zamienimy cząstki na antycząstki. Antywodór i antyuran będą mieć takie same właściwości fizyczne (masę, widmo spektralne i inne) jak wodór i uran. Cząstka i antycząstka mają identyczne masy, spiny oraz czas życia. Podczas zderzenia cząstki i odpowiadającej jej antycząstki następuje ich *anihilacja*, której towarzyszy produkcja nowych cząstek oraz przemiana energii spoczynkowej cząstek ulegających anihilacji w nowy rodzaj energii. Antycząsteczki mają nie tylko

naładowane cząstki. Istnieje antyneutron, antyneutrino i td. Różnica między neutronem i antyneutronem polega, jak zobaczymy później, na tym że neutron posiada dodatni *ładunek barionowy*, a antyneutron ma ujemny ładunek barionowy. Wcześniej powiedzieliśmy, że adrony są zbudowane z kwarków. Kwarki też mają swoje antycząstki - antykwarki. A więc antyneutron "otrzymujemy" z neutronu, jeżeli zawienimy w neutronie wszystkie kwarki na odpowiednie antykwarki. Z antyprotonów i antyneutronów można zbudować antyjądra. A z antyjąderek, dodając pozytony - antyatomy i antymaterię. Niestety do tych czasów nie wiemy odpowiedzi na pytanie - czy istnieje we Wrzechświecie antymateria, antyplanety, antyludzi.

### Leptony. Zasada zachowania ładunku leptonowego

Jeżeli uważnie przeanalizujemy wszystkie procesy zachodzące z udziałem leptonów, to wykryjemy następujące prawidłowości:

- w dowolnym takim procesie bierze udział tylko parzysta liczba leptonów (zwykle dwa lub cztery),
- leptony te można podzielić na pary należące do tej samej grupy leptonów (oba leptony są leptonami elektronowymi lub oba leptonami mionowymi (miu lub tau),

Istnieje bardzo prosty sposób opisu tych prawidłowości. Polega on na wprowadzeniu nowego parametru charakteryzującego lepton, tzw. *ładunku leptonowego*. Parze elektronowej -  $e^-$  i  $\nu_e$  przyporządkowany jest ładunek leptonowy  $L_e = 1$ . Antycząstki -  $e^+$  i  $\tilde{\nu}_e$  mają ładunek leptonowy  $L_e = -1$ . Para mionowa  $\mu^-$  i  $\nu_\mu$  posiada ładunek leptonowy  $L_\mu = +1$ . Ładunek  $L_e$  dla tych cząstek jest równy zeru. Para antimionowa  $\mu^+$  i  $\tilde{\nu}_\mu$  ma ładunek leptonowy  $L_\mu = -1$  ( $L_e = 0$ ). Dla elektronowej pary leptonów odpowiednio  $L_\mu = 0$ . Para mionowa  $\tau^-$  i  $\nu_\tau$  ma swój ładunek leptonowy  $L_\tau = +1$  ( $L_e = L_\mu = 0$ ). Para antimionów  $\tau^+$  i  $\tilde{\nu}_\tau$  posiada ładunek leptonowy  $L_\tau = -1$ . Po wprowadzeniu trzech ładunków leptonowych łatwo sprawdzić, że wszystkie procesy z udziałem leptonów spełniają *zasadę zachowania ładunków leptonowych*: całkowite ładunki leptonowe cząstek z lewej strony reakcji muszą być równe całkowitym ładunkom leptonowym cząstek strony prawej. Na przykład

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e, \quad L_e: 0 = 0 + 1 - 1 \quad ;$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e, \quad L_e: 0 = 0 - 1 + 1 \quad ;$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_\nu, \quad L_e: 0 = -1 + 1 + 0$$

$$L_\mu: -1 = 0 + 0 - 1$$

Procesy zabronione przez zasadę zachowania ładunków leptonowych nie występują w przyrodzie. Na przykład nieistnieją w przyrodzie (nikt i nigdy nie zaobserwował) procesy

$$p + e^- \rightarrow \gamma + \gamma, \quad L_e: 0 + 1 \neq 0 + 0;$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + e^+ + e^-, \quad L_\mu: 1 \neq 0 + 0 + 0$$

$$L_e: 0 \neq 1 - 1 + 1$$

Ładunek leptonowy ma własności podobne do własności ładunku elektrycznego. Jest on addytywny; ładunek leptonowy antycząstki różni się znakiem od ładunku cząstki.

Zasada zachowania ładunku leptonowego jest zgodna z regułą pozwalającą na przenoszenie cząstki z jednej strony równania reakcji na drugą z jednoczesną zamianą jej na antycząstkę. Na przykład

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma \rightarrow e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma,$$

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

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \rightarrow e^- + p \rightarrow n + \nu_e,$$

albo

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \rightarrow p + n \rightarrow e^+ + \nu_e.$$

### Elektrosłabe oddziaływania

Siły słabe działają tylko między cząstkami materii o spinie  $I = 1/2$  (fermiony). Oddziaływania słabe nie były zrozumiane aż do 1967 roku, kiedy A.Salam (Anglia) oraz S.Weinberg (USA) zaproponowali teorię opisującą w jednolity sposób oddziaływania słabe i oddziaływania elektromagnetyczne, podobnie jak Maxwell podał jednolity opis pola elektrycznego i pola magnetycznego. Według teorii elektrosłabych oddziaływań oprócz fotonu (kwantu pola elektromagnetycznego) istnieją jeszcze trzy cząstki  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  o spinie 1, które nazywają *wektorowymi bozonami* (nazwa ta pochodzi z tego, że spin  $I = 1$  ma trzy możliwe rzuty  $m_I = -1, 0, 1$ , tj. trzy "składowe", tak samo jak wektor). Dwa bozony  $W^\pm$  posiadają ładunek elektryczny ( $\pm e$ ), natomiast bozon  $Z^0$  ma zerowy ładunek elektryczny. W odróżnieniu od fotonu bozony wektorowe posiadają duże masy spoczynkowe  $m_0 = 100 \text{ GeV}$  ( $10^{11} \text{ eV}$ ).

Teoria oddziaływania elektroslabego opiera się na zjawisko *spontanicznego łamania symetrii*. Zjawisko to łatwo zrozumieć na przykładzie z fizyki ciała stałego, gdzie poraz pierwszy i było ono wykryto.

Rozpatrzmy zwyczajny magnes, na przykład żelazo. Przy  $T > T_c$  ( $T_c$  - temperatura Kiuri; dla żelaza  $T_c = 770$  C) magnetyczne momenty jonów Fe są nieuporządkowane i wypadkowe namagnesowanie magnesa  $\vec{J} = 0$ . Jednak przy  $T < T_c$  oddziaływania między jonami Fe powodują powstawanie stanu uporządkowanego z  $\vec{J} \neq 0$ . Oddziaływania które powodują powstawanie uporządkowanego magnetycznie stanu opisują oddziaływania, które nie zależą od wyboru osi współrzędnych  $x, y, z$ , tj. w drugim układzie odniesienia  $x', y', z'$  postać równań ruchu magnesa jest taka sama. Mówimy, że równania magnetyka posiadają symetrię kulistą, tj. obrót układu odniesienia wokół dowolnej osi o dowolny kąt nie zmienia postaci tych równań. Jednak przy  $T < T_c$  z tych równań wynika rozwiązanie z  $\vec{J} \neq 0$ , tj. rozwiązanie które nie posiada symetrię kulistą. Nazywamy to zjawisko *spontanicznym łamaniem symetrii*, ponieważ nie w równaniach ruchu nie narusza symetrii; łamanie symetrii pojawia się spontanicznie w rozwiązaniach tych równań.

Według teorii Weinberga-Salama, przy energiach cząstek o wiele większej niż 100 GeV (dużych temperaturach) trzy wektorowe bozony  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  i foton są takimi samymi cząstkami. Podobnie, przy takich dużych energiach nie ma różnicy między fermionami: elektronem, mionem, taonem oraz neutronami trzech rodzajów. Równania pola elektroslabego są nie zależnymi od operacji zamiany jednych cząstek przez drugie. Gdy jednak energia cząstek (temperatura) maleje powstaje spontaniczne łamanie symetrii i rozwiązaniami tych równań są trzy rodzaje "elektronów": elektron, mion, taon; trzy rodzaje neutrino i cztery kwanty oddziaływań: foton,  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$ . Cechy powstałych cząstek nie wykazują symetrii równań z których oni "powstały" - teraz elektron i mion oraz inne cząstki są różnymi cząstkami. Elektron, mion i taon,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  mają masy spoczynkowe, a masa fotonu i neutrino jest równa zeru. Duża masa wektorowych bozonów powoduje, że oddziaływania słabe są o wiele słabsze niż elektromagnetyczne i mają krótki zasięg.

Chociaż u podstaw teorii powstawania namagnesowania w magnesie i teorii elektroslabych oddziaływań leży zjawisko spontanicznego łamania symetrii istnieje wielka różnica między stopniem zrozumienia tych zjawisk. W przypadku magnesu dobrze wiemy jaki oddziaływania istnieją między jonami i dobrze rozumiemy, dla czego symetria jest złamana. Natomiast przyczyna spontanicznego łamania symetrii w oddziaływaniach elektroslabych do

tych czasów nie wiadoma. Żadna ze znanych sił nie jest dostatecznie mocna, aby mogła powodować obserwowane łamanie symetrii oddziaływań.

Bozony  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  zostały wykryte w 1982 - 1983 latach w CERNE'e. Udowodniono, że bozony są niestabilnymi cząstkami i rozpadają się zgodnie ze schematami:

$$\begin{aligned} W^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e, W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, W^+ \rightarrow \tau^+ + \nu_\tau, \\ W^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e, W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, W^- \rightarrow \tau^- + \bar{\nu}_\tau, \\ Z^0 &\rightarrow e^- + e^+, Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+, Z^0 \rightarrow \tau^- + \tau^+. \end{aligned}$$

Zgodnie z teorią elektroslabych oddziaływań beta rozpad zachodzi w dwa etapy:

$$\begin{aligned} n &\rightarrow p + W^-; W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e \\ p &\rightarrow n + W^+; W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e \end{aligned}$$

### Hadrony

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

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

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

Mezony są cząstkami niestabilnymi i przechodzą w elektrony albo pozytony. Wszystkie mezony posiadają masę spoczynkową  $m_0 = (200 - 1000) m_e$ . Wśród mezonów zadziwiająco własności mają *kaony*. 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".

*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

$$\pi^- \rightarrow \Lambda^0 + K^- ,$$

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

$$K^- + n \rightarrow \Xi^- + K^0 .$$

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, wzór

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

gdzie  $N$  - liczba cząstek w izospinowym multiplecie. Dla pionów  $N = 3$ , a więc  $\tau = (N - 1)/2 = 1$  i  $\pi^+$  - pion odpowiada rzutowi  $\tau_3 = 1$ ,  $\pi^0$  - pion - rzutowi  $\tau_3 = 0$ ,  $\pi^-$  - pion odpowiada rzutowi  $\tau_3 = -1$ . Istnieją cząstki, na przykład  $\eta^0$  - mezon oraz  $\Omega^-$  - 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  $\tau_3$ , spełniają relację:

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

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

$$K^+ \rightarrow +1 = \frac{1}{2} + \frac{0+1}{2} \rightarrow S = 1,$$

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

$$\pi^+ \rightarrow +1 = +1 + \frac{0+0}{2} \rightarrow S = 0$$

$$\Xi^0 \rightarrow 0 = \frac{1}{2} + \frac{1-2}{2} \rightarrow S = -2$$

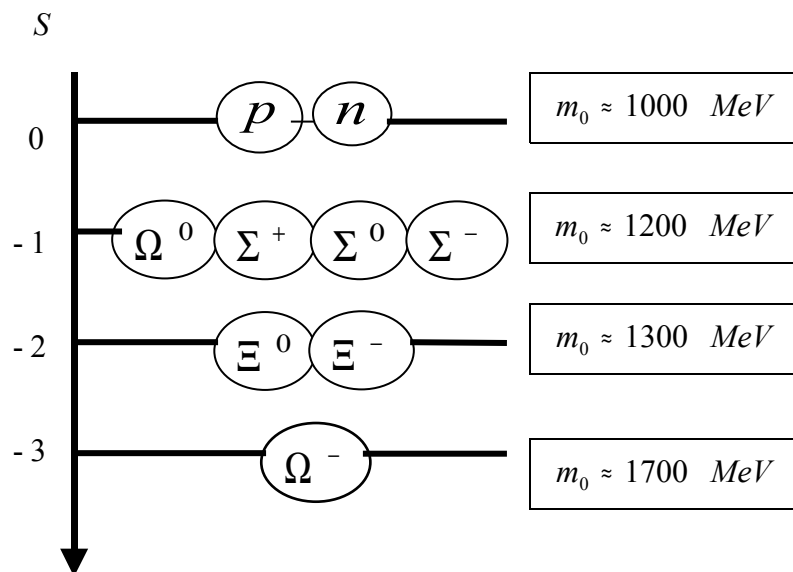
$$\pi^0 \rightarrow 0 = 0 + \frac{0+0}{2} \rightarrow S = 0,$$

$$\Xi^- \rightarrow -1 = -\frac{1}{2} + \frac{1-2}{2} \rightarrow S = -2$$

$$\pi^- \rightarrow -1 = -1 + \frac{0+0}{2} \rightarrow S = 0$$

$$\Omega^- \rightarrow -1 = 0 + \frac{1-3}{2} \rightarrow S = -3$$

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



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

$$\begin{aligned} \Xi^- &\rightarrow \Lambda^0 + \pi^- & \Xi^0 &\rightarrow \Lambda^0 + \pi^0 \\ S: -2 &\neq -1 + 0 & S: -2 &\neq -1 + 0 \end{aligned}$$

oraz

$$\begin{aligned} \Sigma^+ &\rightarrow p + \pi^0 & S: -1 &\neq 0 + 0 \\ \Sigma^- &\rightarrow n + \pi^- & S: -1 &\neq 0 + 0 \end{aligned}$$

również zachodzą wskutek działania sił słabych.

Natomiast proces

$$\begin{aligned} \Sigma^0 &\rightarrow \Lambda^0 + \gamma \\ S: 0 &= 0 + 0 \end{aligned}$$

jest procesem elektromagnetycznym.

Suma wszystkich, oprócz  $Q$ , ładunków ( $B + S + C + T$ ) nazywają hiperładunkiem  $Y$ .

Przez hiperładunek wzór Gell-Manna - Nishijimy ma postać

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

### Kwarki i gluony. Budowa hadronów w modelu kwarkowym

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 $\tau_3$
$u$	$+ 2/3$	$+ 1/3$	$0$	$1/2$	$+ 1/2$
$d$	$- 1/3$	$+ 1/3$	$0$	$1/2$	$- 1/2$
$s$	$- 1/3$	$+ 1/3$	$- 1$	$1/2$	$0$

Antykwarki  $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{s}$  mają przeciwne (do kwarków) ładunki. Budowa mezonów i hadronów w modelu kwarkowym jest przedstawiona w tablicy niżej.

### Budowa hadronów i mezonów w modelu kwarkowym

Cząstki	$Q$	$B$	$S$	$I$	$\tau_3$
$\pi^+ = u\bar{d}$	+1	0	0	$\uparrow\downarrow = 0$	+1
$\pi^0 = u\bar{u}, d\bar{d}$	0	0	0	$\uparrow\downarrow = 0$	0
$\pi^- = \bar{u}d$	-1	0	0	$\uparrow\downarrow = 0$	-1
$K^0 = d\bar{s}$	0	0	1	$\uparrow\downarrow = 0$	-1/2
$\bar{K}^0 = u\bar{s}$	+1	0	1	$\uparrow\downarrow = 0$	+1/2
$\eta^0 = s\bar{s}$	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

Z tej tablicy widać, że cząstka  $\Omega^-$  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.

Obecnie udowodniono, że oprócz trzech kwarków  $u, d, s$  istnieją w naturze jeszcze trzy kwarki  $c, b, t$ , które posiadają nowe ładunki, odpowiednio  $c, b, t$ :

Kwark	Q	I	B	S	c	b	t
$c$	+2/3	1/2	1/3	0	+1	0	0
$b$	-1/3	1/2	1/3	0	0	+1	0
$t$	+ 2/3	1/2	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 elektroślabych 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  $10^9 \text{ GeV}$ . Współczesne akceleratory umożliwiają badanie zderzeń między cząstkami o energii mniej niż  $10^3 \text{ GeV}$  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 najslabsze 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.