

Wykład 42

Cząstki elementarne

Klasyfikacja cząstek elementarnych

Cząstkami elementarnymi będziemy nazywać takie cząstki, których struktury wewnętrznej nie możemy (lub jeszcze nie umiemy przy współczesnym stanie wiedzy) 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 - γ kwant. Gamma kwanty są kwantami pola elektromagnetycznego i występuje tylko w elektromagnetycznych oddziaływaniach. Elektromagnetyczne oddziaływania charakteryzuje stała oddziaływania $\alpha = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \cdot e^2 / 2h$ (stała subtelnej struktury) która jest równa $1/137 \approx 7,3 \cdot 10^{-3}$. 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 grawitacyjne oddziaływania jest najsłabszymi i występują 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 "ciężkich elektrony" - mion μ i taon τ ; oprócz tego do tej grupy należą trzy odpowiednich neutrino - neutrino elektronowe ν_e , neutrino mionowe ν_μ oraz tau-neutrino ν_τ . 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 neutrino. 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 $\tau \cong 10^{-23}$ s). 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 za stabilne cząstki obecnie są uważane 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 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 posiadały takie same właściwości fizyczne (masa, 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 hadrony są zbudowane z kwarków. Kwarki też mają swoje antycząstki - antykwarki. A więc antyneutron "otrzymujemy" z neutronu, jeżeli zamienimy w neutronie wszystkie kwarki na odpowiednie antykwarki. Z antyprotonów i antyneutronów można zbudować antyjądra. A z antyjąderek, dodając pozytony - antyatomy i antimaterię. Niestety do tych czasów nie wiemy odpowiedzi na pytanie - czy istnieje we Wszechświecie antimateria, 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 (lub taonowymi),

Istnieje bardzo prosty sposób opisu tych prawidłowości. Polega on na wprowadzeniu nowego parametru charakteryzującego lepton, tzw. *ładunku leptonowego*. Parze elektronowej - e^- i ν_e przyporządkowany jest ładunek leptonowy $L_e = 1$. Antycząstki - e^+ i $\tilde{\nu}_e$ mają ładunek leptonowy $L_e = -1$. Para mionów μ^- i ν_μ posiada ładunek leptonowy $L_\mu = +1$. Ładunek L_e dla tych cząstek jest równy zeru. Para antymionowa μ^+ i $\tilde{\nu}_\mu$ ma ładunek leptonowy $L_\mu = -1$ ($L_e = 0$). Dla elektronowej pary leptonów odpowiednio $L_\mu = 0$. Para taonów τ^- i ν_τ ma swój ładunek leptonowy $L_\tau = +1$ ($L_e = L_\mu = 0$). Para antytaonów τ^+ 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

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

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

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

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

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

$$\mu^- \rightarrow e^- + e^+ + e^-, \quad \begin{array}{l} L_\mu : 1 \neq 0 + 0 + 0 \\ L_e : 0 \neq 1 - 1 + 1 \end{array}.$$

Ładunek leptonowy ma własności podobne do własności ładunku elektrycznego: jest on addytywny a 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

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

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

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

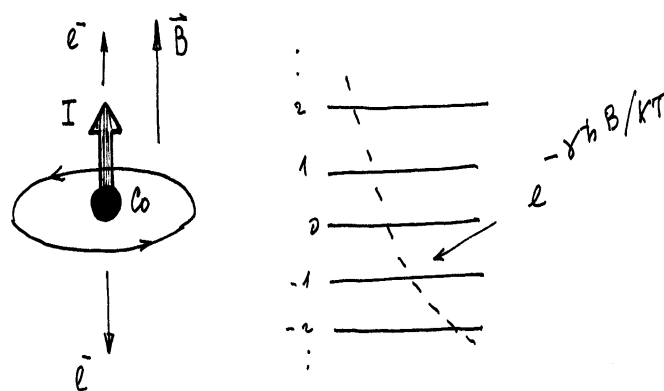
albo

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \rightarrow p + \tilde{n} \rightarrow e^+ + \nu_e.$$

Niezachowanie parzystości w rozpadzie beta. Doświadczenie Wu

W mechanice kwantowej każdy stan układu charakteryzuje się *parzystością*. Parzystość określa symetrię funkcji falowej względem odbicia zwierciadlanego. Odbicie zwierciadlane jest działaniem, które zamienia współrzędne (x, y, z) dowolnego punktu na współrzędne $(-x, -y, -z)$. Wszystkie funkcje falowe opisujące ruch cząstek dzielą się na dwie klasy - parzyste i nieparzyste. *Parzystymi* nazywają się funkcje falowe które nie zmieniają znaku podczas inwersji wszystkich współrzędnych przestrzennych. *Nieparzystymi* nazywamy funkcje falowe które zmieniają znak podczas inwersji współrzędnych przestrzennych. Z podstaw mechaniki kwantowej wynika, że parzystość układu spełniającego równanie Schrödingera jest zachowana. Przez długi czas sądzono, że zasada zachowania parzystości jest takim samym uniwersalnym prawem przyrody jak zasada zachowania energii. Jednak w roku 1956 podczas badania własności K-mezonów (kaonów) wykryto, że mezony te w niektórych procesach rozpadu zachowują się jak cząstki parzyste, w innych zaś - jak cząstki nieparzyste. W tym samym roku

Lee i Yang przypuścili, że parzystość może być niezachowana również w rozpadzie beta. Zgodnie z sugestiami Lee i Yanga niespełnienie zasady zachowania parzystości w rozpadzie β można wykryć badając rozpad jąder spolaryzowanych, tj. jąder które mają taką samą orientację spinu w przestrzeni. Takie doświadczenie wykonała C.B.Wu w 1957 r., w którym zmierzono rozkład kątowy elektronów emitowanych przez spolaryzowane jądra $^{60}_{27}\text{Co}$. Jądra Co są beta promieniotwórczymi, i wskutek β rozpadu elektron spolaryzowanego jądra może być emitowany w kierunku zgodnym z kierunkiem spinu jądra ^{60}Co , albo w kierunku przeciwnym do kierunku orientacji spinu jądra ^{60}Co .



Polaryzacja jąder ^{60}Co (spin $I = 5$) była dokonana stosując silne stałe pole magnetyczne i bardzo niskie (rzędu 0,001 K) temperatury. Schemat uproszczony doświadczenia Wu jest pokazany na rysunku obok. Obwód z prądem wytwarza pole magnetyczne \vec{B} .

Jak widać z rysunku przy zwierciadlanym odbiciu jądra ^{60}Co i kołowego zwoju otrzymujemy takie same kierunki spina jądra i kierunku pola B. Przypomnimy, że spin i pole magnetyczne opisują wektory aksyjne, tj. wektory, które przekształcają się jako iloczyn wektorowy dwóch zwykłych wektorów). Wiec "urządzenie" Wu posiada symetrię zwierciadlaną, a zatem funkcja opisująca rozkład emitowanych elektronów też powinna mieć symetrię zwierciadlaną, tj. liczba elektronów emitowanych wzdłuż pola \vec{B} musi być równa liczbie emitowanych elektronów przeciw pola \vec{B} . Z pomiarów liczby emitowanych elektronów wzdłuż i

przeciw pola \vec{B} , wynikało że elektrony są emitowane przeważnie w kierunku przeciwnym do kierunku orientacji spinu jądra.

Parzystość kombinowana Landaua

Ponieważ zasada zachowania parzystości wynikała z założenia symetrii przestrzeni względem odbicia, to wykryte przez Wu niezachowanie parzystości oznacza asymetrię przestrzeni względem odbicia zwierciadlanego. Można by więc powiedzieć, że przestrzeń ma skrętność. Wniosek taki wydaje się bardzo dziwny, jeśli odniesiemy go do pustej przestrzeni.

Aby zachować symetrię pustej przestrzeni względem inwersji, Landau zaproponował, aby symetrię obserwowaną w procesach fizycznych powiązać z ładunkiem (nie tylko elektrycznym) cząstki. Według Landaua przy inwersji przestrzeni wszystkie cząstki przechodzą w antycząstki i prawa przyrody powinny być niezmiennymi względem inwersji kombinowanej, będącą nałożeniem inwersji współrzędnych P i sprzężenia ładunkowego C (zamiany wszystkich cząstek na antycząstki).

$$CP = 1 .$$

Dla grawitacyjnych, elektromagnetycznych i silnych oddziaływań wszystkie zjawiska fizyczne są niezmiennie względem operacji P ($P=1$ - prawo zachowania parzystości) i operacji ładunkowego sprzężenia C ($C=1$ - zasada sprzężenia ładunkowego). W przypadku słabego oddziaływania zjawiska fizycznie są niezmiennie tylko względem kombinowanej inwersji CP . Przy zastosowaniu kombinowanej inwersji Landaua do doświadczenia Wu otrzymujemy, że ^{60}Co przechodzi w antycobalt $^{-60}$, elektrony w obwodzie - w pozytony, beta elektrony - w pozytony. Zamiana elektronów na pozytony powoduje zmianę kierunku pola magnetycznego \vec{B} . Emitowany pozytony będą w odróżnieniu od doświadczenia Wu wyemitowany wzdłuż (a nie przeciw, jak dla elektronów) kierunku pola \vec{B} .

Teorii podłużnie spolaryzowanego neutrino. Oscylacje neutrino

Neutrino i antyneutrino różnią się ładunkiem leptonowym oraz sposobem oddziaływania z materią. Różnica neutrino i antyneutrino okazała się bardzo pogładowa w teorii podłużnie spolaryzowanego neutrino, czyli dwukomponentowej teorii neutrino (Landau, Lee, Yang, Salam). Z teorii tej wynika, że wektor spinu neutrino ma zwrot przeciwny do zwrotu wektora pędu \vec{p} neutrino, a dla antyneutrino zwrot spinu cząstki pokrywa się ze zwrotem jego wektora pędu. Jeżeli skojarzymy sobie spin z obrotem, to możemy porównać ruch antyneutrino z ruchem

śruby prawoskrętnej, a ruch neutrino z ruchem śruby lewoskrętnej. Dlatego mówimy, że antyneutrino ma skrętność $+1$, a neutrino ma skrętność -1 .

Teorii dwukomponentowego neutrino zakładają, że neutrino posiadają spoczynkową masę m_0 zerową i poruszają się z prędkością światła c . Jeśli m_0 nie jest równa zero, a zatem prędkość neutrino $v < c$, to zawsze można znaleźć układ odniesienia dla, na przykład neutrino, w którym spin neutrino byłby równoległym do wektora pędu \vec{p} , tj. układ w którym neutrino przekształci się w antyneutrino.

Neutrino jak wiemy są trzech rodzajów: elektronowe, mionowe, tau - neutrino. Głównym źródłem neutrin dla nas są neutrino słoneczne czyli neutrino, które powstają na Słońcu wskutek reakcji syntezy termojądrowych. Z analizy ilości neutrino elektronowych docierających do powierzchni Ziemi wynika, że do nas dochodzi tylko 1/3 neutrino od ogólnej liczby, wynikającej z temperatury Słońca. Obecnie istnieje hipoteza, że neutrino elektronowe po drodze do Ziemi, przechodzą w neutrino innych rodzajów, które dopóki nie umiemy rejestrować. Hipoteza oscylacji neutrino (transformacji neutrino jednego rodzaju w neutrino drugiego rodzaju) wymaga, żeby neutrino posiadali niezerową masę spoczynkową. Niestety do tych czasów to jest tylko hipotezą.

Niezachowanie kombinowanej parzystości. Twierdzenie Ludersa - Paulego

W latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku w promieniowaniu kosmicznym były wykryte dwie cząstki K^0 i \tilde{K}^0 , które później nazwali *kaonami*. K^0 i \tilde{K}^0 są cząstką i antycząstką. Kaony mają spin $I = 0$, tj. są bozonami i parzystość $P(K^0, \tilde{K}^0) = -1$. Kaony nie są stabilnymi cząstkami i zachowują się dziwnie w porównaniu z rozpadami innych cząstek. Na przykład kaony mogą rozpadać się na dwa albo trzy piony

$$\begin{aligned} K^0, \tilde{K}^0 &\rightarrow \pi^+ + \pi^- , \\ K^0, \tilde{K}^0 &\rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^- . \end{aligned}$$

Piony ($\pi^{\pm,0}$) mają zerowe spiny i ujemne parzystości wewnętrzne ($P(\pi^-, \pi^0, \pi^+) = -1$). Ponieważ kaony mają parzystość wewnętrzną równą (-1) ($P\psi(K^0, \tilde{K}^0) = -\psi(K^0, \tilde{K}^0)$), to rozpad kaonów na dwa piony jest sprzecznym z zasadą zachowania parzystości. Istotnie dla rozpadu kaonu na dwa piony operacja P jest równoważna zamianie pionów miejscami, a taka zamiana prowadzi do pomnożenia funkcji falowej dwu pionów przez $(-1)^l$, gdzie l jest liczbą

kwantową charakteryzującą względny orbitalny ruch pionów. W układzie odniesienia, gdy kaon znajduje się w spoczynku, z zasady zachowania momentu pędu wynika, że $l = 0$. A zatem parzystość funkcji falowej dwu pionów jest równa $+1$ ($P\psi(\pi^+ + \pi^-) = \psi(\pi^+ + \pi^-)$), natomiast parzystość funkcji falowej kaonu jest równa -1 . Kaony były pierwszymi cząstkami dla których było stwierdzono niezachowanie parzystości. Wiemy jednak, że z hipotezy Landaua wynika, że powinna być zachowana kombinowana CP inwersja. Rozpatrzmy znów proces rozpadu kaonów na dwa piony. Dokonujemy teraz operacji CP nad funkcją falową dwu pionów. Operacja P , jak widzieliśmy nie zmienia falowej funkcji dwu pionów. Operacja C transformuje ujemny pion w dodatni i na odwrót, a więc również sprowadza się do zamiany pionów miejscami. Wobec tego

$$CP\psi(\pi^+ + \pi^-) = \psi(\pi^+ + \pi^-), \text{ tj. } CP = +1.$$

Działając operatorem CP na funkcję falową kaonu otrzymujemy

$$CP\psi(K^0) = -C\psi(K^0) = -\psi(\tilde{K}^0) \neq \psi(K^0),$$

ponieważ K^0 i \tilde{K}^0 są różnymi cząstkami, które w różny sposób oddziałują z materią. Więc reakcja rozpadu kaonów na dwa piony jest sprzeczna nie tylko z zasadą zachowania parzystości, ale również z zasadą zachowania parzystości kombinowanej. Dla tego żeby zachować słuszność zasady zachowania parzystości kombinowanej Gell-Mann, oraz Pais i Piccioni przypuścili, że kaony K^0 i \tilde{K}^0 są mieszaniną (superpozycją) dwóch innych cząstek elektrycznie obojętnych K_1^0 i K_2^0 mających różne czasy życia, różne kanały rozpadu i nieco inne masy. Kaony K_1^0 i K_2^0 są dwoma "czystymi" stanami kaonów.

Według Paisa i Piccioni funkcje falowe kaonów K^0 i \tilde{K}^0 należy zapisać w postaci superpozycji

$$\begin{aligned} \psi(K^0) &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi(K_1^0) + \psi(K_2^0)], \\ \psi(\tilde{K}^0) &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi(K_2^0) - \psi(K_1^0)]. \end{aligned}$$

Z tych wzorów łatwo znaleźć, że funkcje falowe cząstek K_1^0 i K_2^0 są

$$\psi(K_1^0) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi(K^0) - \psi(\tilde{K}^0)],$$

$$\psi(K_2^0) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi(K^0) + \psi(\tilde{K}^0)].$$

Hypoteza Gell-Manna, Paisa i Piccioni rozwiązuje trudności związane z rozpadem kaonów. Obliczymy parzystości kombinowane funkcji falowych kaonów K_1^0 i K_2^0

$$P\psi(K_1^0) = -\psi(K_1^0),$$

$$CP\psi(K_1^0) = -\frac{1}{\sqrt{2}} [\psi(\tilde{K}^0) - \psi(K^0)] = \psi(K_1^0),$$

$$CP(K_1^0) = +1$$

$$P\psi(K_2^0) = -\psi(K_2^0),$$

$$CP\psi(K_2^0) = -\frac{1}{\sqrt{2}} [\psi(\tilde{K}^0) + \psi(K^0)] = -\psi(K_2^0),$$

$$CP(K_2^0) = -1$$

Z otrzymanych wartości CP dla funkcji kaonów K_1^0 i K_2^0 widzimy, że kaony K^0 i \tilde{K}^0 mogą rozpadać się albo na dwa piony (ze stanu, który opisuje funkcja falowa kaonu K_1^0 , $CP = 1$), albo na trzy piony (ze stanu, który opisuje funkcja falowa kaonu K_2^0 , $CP = -1$). Niezwykle osiągnięcia w badaniach neutralnych kaonów dali możliwość rozdzielić kaony K_1^0 i K_2^0 (kaon K_2^0 ma większy czas życia niż kaon K_1^0) i potwierdzić hipotezę Gell-Manna, Paisa i Piccioni.

Kaon K_2^0 ma parzystość kombinowaną $CP = -1$, a więc zgodnie z zasadą zachowania parzystości kombinowanej CP , rozpad kaonu K_2^0 na dwa piony

$$K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$CP: -1 \neq +1$$

jest zabroniony. Jednak w 1964 roku Fitch, Cronin, Thorndik i Christenson (USA) doświadczalnie wykryli rozpad kaonu K_2^0 na dwa piony. Po opublikowaniu tych wyników wykonano wiele prac doświadczalnych podczas których te wyniki zostały potwierdzone.

Niezachowanie parzystości kombinowanej CP jest efektem bardzo słabym rzędu 0,2 % (czyli 2 rozpady kaonu K_2^0 na dwa piony przypadają na 1000 rozpadów kaonu K_2^0 na trzy piony).

W relatywistycznej teorii pola istnieje tak zwane *twierdzenie CPT* lub *twierdzenie Ludersa-Pauliego*, które mówi, że dowolne oddziaływania są niezmiennicze względem iloczynu trzech operacji: sprzężenia ładunkowego (zamiany cząstek na antycząstki) C , inwersji P oraz odwrócenia czasu T (zamiany T na $-T$)

$$CPT = 1 .$$

Obecnie wszystkie prawa fizyki są niezmiennymi jeżeli odwrócimy czas T . Niezachowanie parzystości kombinowanej w rozpadzie kaonu K_2^0 wskazuje, że istnieje wyróżniony kierunek zmiany czasu. Do tych czasów nie istnieje odpowiedzi na pytanie: czy niezachowanie parzystości kombinowanej powoduje powstawanie "strzałki" czasu od przeszłości ku przyszłości?

Elektrosłabe oddziaływania

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 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} eV).

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

Rozpatrzmy zwyczajny magnes, na przykład żelazo. Przy $T > T_c$ (T_c - temperatura Ciury; dla żelaza $T_c = 770 \text{ C}$) magnetyczne momenty jonów Fe są nieuporządkowane i wypadkowe

namagnesowanie magnesu $\vec{J} = 0$. 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 opisuje hamiltonian, który nie zależy od wyboru osi współrzędnych x, y, z , tj. w drugim układzie odniesienia x', y', z' postać równań ruchu magnesu 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 *spontanycznym łamaniem symetrii*, ponieważ nic 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 magnezie 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 rokach w CERNE. Udowodniono, że bozony są niestabilnymi cząstkami i rozpadają się zgodnie ze schematami:

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

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

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