

Klasyfikacja cząstek elementarnych

- Wszystkie znane cząstki elementarne są fermionami lub bozonami. Fermiony mają wewnętrzny moment pędu, czyli spin, połówkowy, tj. wynoszący $\frac{\hbar}{2}, \frac{3\hbar}{2}, \frac{5\hbar}{2}, \dots$, gdzie $\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$ jest stałą Plancka, i podlegają statystyce Fermi-Diraca, a bozony mają spiny całkowite wynoszące $0, \hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots$ i podlegają statystyce Bose-Einsteina.
- Podleganie statystyce Fermi-Diraca oznacza, w szczególności, obowiązywanie zakazu Pauliego, głoszącego, że dwa fermiony (a tym bardziej trzy i więcej) nie mogą występować w tym samym stanie kwantowym. Bozony natomiast nie podlegają zakazowi Pauliego.
- Twierdzenie o związku spinu ze statystyką, które dowodzi się na gruncie kwantowej teorii pola, pokazuje, że gdyby cząstki o spinie całkowitym podlegały zakazowi Pauliego, to naruszona byłaby fundamentalna zasada przyczynowości, stwierdzająca, że przyczyna zawsze poprzedza skutek. Byłoby podobnie, gdyby cząstki o spinie ułamkowym nie podlegały zakazowi Pauliego.
- Każdej cząstce elementarnej odpowiada antycząstka o tej samej masie, której wszelkie ładunki są przeciwne niż cząstki. Tak np. dodatnio naładowanemu protonowi odpowiada antyproton, mający tę samą co proton masę, lecz ujemny ładunek elektryczny. W przypadku cząstek nie niosących żadnych ładunków, tzw. cząstek istotnie obojętnych jak foton, antycząstka jest tożsama z cząstką.
- Istnienie antycząstek wiąże się z faktem, że równanie dyspersyjne określające energię cząstki o masie m jako funkcję pędu jest zwykle postaci $E_p^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$ o dwóch rozwiązaniach $E_p = \pm\sqrt{m^2 + \mathbf{p}^2}$, z których ujemne przypisujemy antycząstkom.
- Cząstki elementarne są stabilne i niestabilne. Stabilne nie ulegają rozpadowi, a dokładniej, ewentualnego rozpadu nie udało się zarejestrować, bo np. czas życia jest dłuższy niż wiek wszechświata. Zaledwie kilka cząstek – elektron, proton, neutrino – jest stabilnych, pozostałe są niestabilne jak choćby neutron podlegający rozpadowi beta minus: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Czasy życia cząstek wahają się w bardzo szerokim zakresie. Średni czas życia neutronu wynosi ok. 15 minut, a tzw. rezonansów hadronowych 10^{-23} s.

Prawo rozpadu

- Prawo rozpadu wyprowadzamy rozważając $N(t)$ niestabilnych cząstek i zakładając, że liczba cząstek, które rozpadły się w interwale czasu od t do $t+dt$, jest proporcjonalna do liczby $N(t)$ i dt tzn.

$$dN = -\alpha N dt,$$

gdzie α jest pewną dodatnią stałą proporcjonalności, którą wyznaczymy później. Znak minus oznacza, że liczba N ubywa w czasie. Rozwiązując proste równanie różniczkowe z warunkiem początkowym $N(t=0) = N_0$,

znajdujemy $N(t) = N_0 e^{-\alpha t}$. Prawdopodobieństwo, że cząstka przeżyje do czasu t (prawdopodobieństwo przetrwania - survival probability) wynosi

zatem $P_s(t) = \frac{N(t)}{N_0} = e^{-\alpha t}$. Zauważmy, że $P_s(t=0) = 1$, a $P_s(t=\infty) = 0$.

Prawdopodobieństwo rozpadu cząstki w interwale czasu od 0 do t jest prawdopodobieństwem dopełniającym do $P_s(t)$ i wynosi $1 - P_s(t)$.

- Gęstość prawdopodobieństwa $p(t)$, że cząstka rozpadnie się w czasie między t a $t+dt$, znajdujemy jako

$$p(t) dt = 1 - P_s(t + dt) - (1 - P_s(t)) = -\frac{dP_s(t)}{dt} dt.$$

A zatem

$$p(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = \alpha e^{-\alpha t}.$$

Widzimy, że zachodzi

$$\int_0^{\infty} dt p(t) = 1,$$

czyli gęstość prawdopodobieństwa $p(t)$ jest poprawnie unormowana.

- Średni czas życia cząstki określa formuła

$$\tau = \int_0^{\infty} dt t p(t) = \alpha \int_0^{\infty} dt t e^{-\alpha t} = \frac{1}{\alpha},$$

więc parametr α jest właśnie odwrotnością średniego czasu życia.

Prawdopodobieństwo $P_s(t)$ i gęstość prawdopodobieństwa $P(t)$ zapisujemy jako

$$P_s(t) = e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad p(t) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Sily mikroświata

- W mikroświecie występują cztery rodzaje sił:
 - grawitacyjne,
 - elektromagnetyczne,
 - silne,
 - słabe.
- Oddziaływania grawitacyjne mają nieskończenie długi zasięg, więc występują zarówno w mikro- jak i w makroświecie. Energia potencjalna będąca wynikiem oddziaływania dwóch punktowych obiektów o masie m wynosi

$$E_g = -G \frac{m^2}{r} = -\frac{Gm^2}{\hbar c} \frac{\hbar c}{r} = -\alpha_g \frac{\hbar c}{r},$$

gdzie G jest stałą grawitacyjną, $G = 7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, $\hbar c$ jest iloczynem stałej Plancka i prędkości światła, $\hbar c = 3 \cdot 10^{-24} \text{ J m} \approx 200 \text{ MeV fm}$,

a $\alpha_g \equiv \frac{Gm^2}{\hbar c}$ jest bezwymiarową stałą określającą intensywność

oddziaływania. Jeśli oddziaływującymi obiektami są dwa protony o masie $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, to $\alpha_g \approx 10^{-40}$. W teorii kwantowej, której dotychczas nie udało się sformułować, nośnikiem oddziaływania grawitacyjnego jest hipotetyczny *grawiton* – istotnie neutralny, bezmasowy bozon o spinie $2\hbar$.

- Oddziaływania elektromagnetyczne są podobnie jak oddziaływania grawitacyjne nieskończenie długo zasięgowe i podobnie występują w mikro- i makroświecie. Energia potencjalna, będąca wynikiem oddziaływania dwóch elementarnych ładunków, wynosi (w układzie Gaussa)

$$E_{\text{EM}} = \frac{e^2}{r} = \frac{e^2}{\hbar c} \frac{\hbar c}{r} = \alpha \frac{\hbar c}{r},$$

gdzie $\alpha \approx \frac{1}{137} \approx 10^{-2}$. W elektrodynamice kwantowej nośnikiem

oddziaływania jest *foton* – istotnie neutralny, bezmasowy bozon o spinie \hbar .

- Widzimy, że w przypadku oddziaływania dwóch protonów, energia elektromagnetyczna jest 38 rzędów wielkości większa od grawitacyjnej.

- Oddziaływania silne występują jedynie na odległościach rzędu rozmiarów protonu czyli $r_p \approx 1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$. Oddziaływanie to jest odpowiedzialne za wiązanie nukleonów w jądra atomowe. Masa nukleonu też jest generowana przez oddziaływania silne, jest niejako energią potencjalną, którą zapiszemy na podobieństwo energii elektromagnetycznej jako

$$E_s = \alpha_s \frac{\hbar c}{r},$$

gdzie α_s jest stałą sprzężenia oddziaływań silnych. Jej wielkość oszacujemy przyjmując, że $E_s = m_p$, gdy $r = 1 \text{ fm}$. Przyjmując za masę protonu m_p wartość 1 GeV, otrzymujemy $\alpha_s \approx 5$. Widzimy, że $\alpha_s / \alpha_{\text{EM}} \approx 700$. W teorii kwantowej, nośnikiem oddziaływania silnego są *gluony* – bezmasowe bozony o spinie \hbar .

- Energia elektromagnetyczna E_{EM} na odległości $r = 1 \text{ fm}$ wynosi 1,4 MeV, co odpowiada, mającej przypuszczalnie pochodzenie elektromagnetyczne, różnicy masy neutronu i protonu, $m_n - m_p = 939,6 - 938,3 = 1,3 \text{ MeV}$.
- Oddziaływania słabe odpowiedzialne są w szczególności za rozpady licznych cząstek elementarnych, np. neutronu. W teorii kwantowej, nośnikiem oddziaływania słabego są bozony W^\pm, Z o spinie \hbar . Ponieważ masa bozonu W wynosi $m_W = 80 \text{ GeV}$, a bozonu Z jest jeszcze większa $m_Z = 91 \text{ GeV}$, oddziaływanie to ma bardzo krótki, nawet mikroskopowo, zasięg, wynoszący $r_W = \frac{\hbar c}{m_W} \approx 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ fm}$.
- Jeśli energię potencjalną oddziaływania słabego zapisać na podobieństwo energii potencjalnej, odpowiadającej ekranowanemu potencjałowi Coulomba tj. jako

$$E_W = \alpha_W \frac{\hbar c}{r} e^{-\frac{r}{r_W}},$$

wówczas stała sprzężenia wynosi ok. $\alpha_W \approx \frac{1}{30}$ i jest większa od $\alpha \approx \frac{1}{137} \approx 10^{-2}$. Jednak dla $r = 1 \text{ fm}$, „słaba” energia potencjalna jest rzędu 10^{-172} MeV , co jest skutkiem bardzo małego zasięgu sił słabych.

- Tabela podsumowuje główne charakterystyki czterech sił mikroświata.

oddziaływanie	nośnik	stała sprzężenia α	zasięg
grawitacyjne	<i>grawiton</i>	10^{-40}	∞
elektromagnetyczne	<i>foton</i>	10^{-2}	∞
silne	<i>gluon</i>	1	$\leq 10^{-13}$ cm
słabe	W^\pm, Z	10^{-1}	$\leq 10^{-16}$ cm

- Cząstki elementarne dzielimy na wymienione w tabeli nośniki oddziaływań i cząstki materii.
- Cząstki elementarne klasyfikowane są głównie ze względu na oddziaływania jakim podlegają. Cząstki materii oddziaływujące silnie nazywane są hadronami, natomiast cząstki, które nie doświadczają tego oddziaływania noszą nazwę leptonów. Zarówno hadrony, jak i leptony oddziałują słabo, a jeśli są obdarzone ładunkami elektrycznymi oddziałują też elektromagnetycznie. Wszystkie cząstki podlegają też zapewne grawitacji, która w świecie cząstek jest jednak tak słaba, że niewykrywalna.

Hadrony

- Wśród hadronów, których znamy kilkaset, mamy fermiony i bozony. Fermionowe hadrony, w szczególności składniki jądra atomowego – protony i neutrony, zwane łącznie nukleonami, określa się jako bariony. Niosą one addytywny ładunek – liczbę barionową, która wedle naszej współczesnej wiedzy jest, tak jak ładunek elektryczny, wielkością ściśle zachowywaną. Liczba barionowa wszystkich barionów wynosi 1, zaś antybarionów -1 .
- Hadrony będące bozonami są określane jako mezony. Niosą one zerową liczbę barionową. Do mezonów zaliczamy najbliższe hadrony – piony π^+, π^-, π^0 .

Wykład V cd.

Fizyka cząstek elementarnych

- Rozważmy zachowanie liczby barionowej w kilku reakcjach. Liczba barionowa stanu początkowego procesu $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$ wynosi 2. Ponieważ pion ma zerową liczbę barionową, więc liczba barionowa stanu końcowego równa jest także 2. W przypadku procesu fotoprodukcji pionu $p + \gamma \rightarrow n + \pi^+$, liczba barionowa stanu początkowego i końcowego wynosi 1. Podobnie jest w przypadku rozpadu $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$, bowiem cząstka Λ^0 jest barionem. Antybariony, jak antyproton \bar{p} , niosą ładunek barionowy równy -1 , więc liczba barionowa stanu początkowego reakcji $p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ wynosi zero, tak jak i liczba barionowa stanu końcowego.
- Wśród hadronów zarówno barionów i mezonów występują hadrony określano jako dziwne. Niosą one addytywny ładunek zwany dziwnością, który jest zachowywany w oddziaływaniach silnych, lecz naruszany w oddziaływaniach słabych. Najłżejszymi mezonami dziwnymi są kaony. Dziwne bariony to hiperony, z których najłżejszym jest cząstka Λ^0 . Dziwność zostanie szerzej omówiona przy okazji modelu kwarkowego hadronów.

Leptony

- Leptony są fermionami o spinie $\hbar/2$, pozbawionymi struktury wewnętrznej, są wedle obecnej wiedzy prawdziwie elementarne.
- Leptony występują parami – pierwszą tworzy najwcześniej poznany lepton czyli elektron oraz neutrino elektronowe: (e, ν_e) .
- Istnienie neutrino postulował Wolfgang Pauli w 1930 roku na podstawie analizy rozpadu beta minus takiego jak np. rozpad izotopu wodoru trytu na hel 3, zachodzącego wedle schematu: ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$. Obserwując hel 3 i elektron, stwierdzamy niezachowanie energii. Pauli doszedł do wniosku, że brakującą energię unosi lekka, neutralna cząstka, która nie jest rejestrowana. Enrico Fermi nazwał cząstkę *neutrinem*. Zgodnie ze współczesną terminologią w rozpadzie beta minus występuje antyneutrino elektronowe.
- Ponieważ elektron jest naładowany elektrycznie oddziałuje elektromagnetycznie, natomiast neutrino jedynie słabo, co bardzo utrudnia jego detekcję. Bezpośrednio udało się neutrino zarejestrować dopiero w 1956 roku, obserwując odwrotny proces beta plus: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$.

Wykład V cd.

Fizyka cząstek elementarnych

- Drugi lepton – mion o masie 105, 7 MeV – odkryto w 1936 roku. Obserwując rozpad mionu $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$, stwierdzono też obecność neutrin. Nie było jednak jasne czy mamy do czynienia z jednym czy z dwoma typami neutrin. Dopiero w 1961 roku wykonano eksperyment, w którym stwierdzono, że neutrina pochodzące z rozpadów ujemnych mionów produkują oddziałując z materią nie elektrony, lecz miony. Zachodziła bowiem reakcja typu $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$.
- W roku 1974 zaobserwowano trzeci lepton – tau o masie 1777 MeV. Zapostulowano też istnienie neutrina tauonowego, które bezpośrednio zarejestrowano w 2000 roku.
- Lista i własności leptonów podsumowuje tabela, w której l_e, l_μ, l_τ oznaczają elektronową, mionową i tauonową liczbę leptonową.

lepton	masa [MeV]	czas życia [s]	ładunek elektryczny	l_e	l_μ	l_τ
e^-	0,511	∞	e	1	0	0
ν_e	0 ^{*)}	∞ ^{**)}	0	1	0	0
μ^-	105,7	$2,2 \cdot 10^{-6}$	e	0	1	0
ν_μ	0 ^{*)}	∞ ^{**)}	0	0	1	0
τ^-	1 777	$2,9 \cdot 10^{-13}$	e	0	0	1
ν_τ	0 ^{*)}	∞ ^{**)}	0	0	0	1

^{*)} Niedawno wykonane pośrednie pomiary sugerują, że neutrina mają niewielką, lecz niezerową masę rzędu 1 eV, a nawet mniejszą.

^{**)} Najnowsze odkrycia pokazują, że w przyrodzie występuje zjawisko oscylacji neutrin, czyli samoistne przekształcanie się neutrin jednego typu w drugi typ. Trudno więc mówić o nieskończonym czasie życia neutrina danego typu.

- Leptonom przypisuje się liczbę leptonową, a dokładniej leptonową liczbę elektronową, mionową lub tauonową. Jak pokazuje tabela, wynosi ona 1 lub 0 dla leptonów oraz -1 lub 0 dla antyleptonów. W reakcjach w których uczestniczą leptony, stwierdzono zachowanie liczby leptonowej, przy czym każda liczba zachowywana jest oddzielnie.
- W procesie rozpadu mionu $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$ mamy w początkowym stanie $l_\mu = 1$ i $l_e = 0$ oraz te same liczby w stanie końcowym.