

Глава 19

СТАНДАРТЕН МОДЕЛ

- § 19.1. Въведение
Структура; елементарни частици; фундаментални частици; признаци за класификация; класификация по взаимодействие; силно взаимодействие и адрони; кварки; античастици. 480
- § 19.2. Фундаментални частици на веществото
Дванадесет фундаментални частици на веществото; поколения на фундаменталните фермиони; горни и долни кварки; три неутрина; заряд на кварките. 483
- § 19.3. Античастици
Античастици; вътрешно свойство; лептонен заряд на лептоните; запазване на заряда; разпадане на неутрона и мистериозното неутрино; позитрон; фундаментални лептони и антилептони; барионен заряд; етимология; антикварки. 486
- § 19.4. Четирите фундаментални сили
Фундаментални сили; силно взаимодействие; кварки и лептони и силното взаимодействие; кварки и свободно състояние; слабо взаимодействие; фермиони и слабото взаимодействие. 490
- § 19.5. Преносители на взаимодействието
Фундаментални бозони; взаимодействия и преносители; промежуточни бозони; промежуточни бозони и фермиони; електро-слабо взаимодействие; Хигс бозон; цвят; квантова хромодинамика; Велико обединение; теория на всичко. 492

ДОПЪЛНИТЕЛНА ЛИТЕРАТУРА

1. Allday J., Quarks, Leptons and the Big Bang, 2nd ed., IPP, 2002, ch. 1, 5.
2. Grupen C., Astroparticle Physics, Springer, 2005, Germany, ch.2.
3. Young H. D. and R. A. Freedman, University Physics, 12th ed., Pearson Education, 2008, San Francisco, ch. 44.

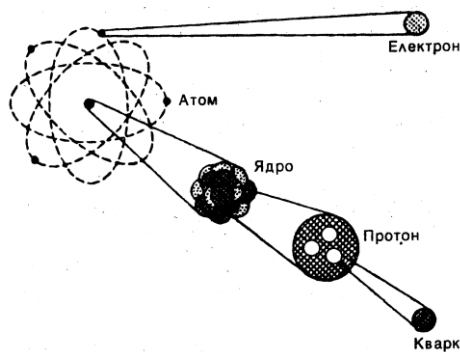
4. Уилямс У. С. С., Физика на ядрото и елементарните частици, УИ „Св. Кл. Охридски“, 2000, София, гл. 13, 14.

§ 19.1. ВЪВЕДЕНИЕ

В наше време възникна непознато досега с плашещ мащаб отчуждение между потъналия в изследванията си научен работник и неспециалиста за структурата на материята и особено за нейните най-малки градивни „тухлички“. Целта на последните три глави е да разкажем достъпно и понятно за микроструктурата на заобикалящия ни свят и нейното описание, като избягваме несъществените технически подробности, модерните сложни математически теории и особено професионалния жаргон.

Главният въпрос, който мислещите хора са поставяли още в самото начало на раждането на цивилизацията, е бил как са устроени светът и заобикалящата ни материя. Още древните гърци (Галес Милетски) са смятали, че веществото се състои от първични, неделими по-нататък частици – елементарни частици. До края на XIX в. ролята им се изпълнява от атома (атом в превод означава неделим). През 1898 г. е открита първата субатомна частица – електронът, а през 1911 г. – ядрото. Веднага възниква съмнение, че то има вътрешна структура. Ако няма, тогава на стотината различни атоми биха съответствали стотина различни ядра! Откриването на радиоактивността доказало, че ядрата имат структура. По-късно с откриването им за елементарни частици са считани електронът, протонът и неутронът – дълго време се е вярвало, че те са безструктурни.

След откриването на ядрото доста години съществува представата, че веществата се състоят от молекули, те – от атоми, атомите – от електрони и ядра, а ядрата – от протони и неутрони. Последните са изградени от частици, наречени кварки. Дали те са онези първични неделими частици? На този въпрос съвременната физика не може с увереност да отговори. Развитието на представите ни за на веществото е показано на фиг. 19-1.



Фиг. 19-1. Развитието на представите за структурата на веществото.

В съвременната физика елементарни частици са онези субатомни частици, които отговарят на условието да не са атоми или атомни ядра. (Изключение прави само протонът в един случай – той е ядро на водородния атом.) За описанието на елементарните частици е създаден

стандартният модел (СМ). Елементарните частици са с много малки маси ($\leq 10^{-26}$ kg) и размери ($\leq 10^{-15}$ m). Почти всички са нестабилни – много от тях съществуват за изключително кратко време – 10^{-20} s. Те са типично квантови обекти и свойства им се описват с различни квантови характеристики. Различните квантови закономерности и характеристики служат за различната им систематика. Най-обща е систематиката, основана на типа на взаимодействието на частиците. Характеристиките и закономерностите им са толкова необичайни, че за изтъкването им квантовата механика се оказала недостатъчна и се наложила разработката на квантовата електродинамика, на теорията на квантовата хромодинамика и на квантовата теория на полето.

Частиците могат да имат своя структура, т.е. да се състоят от други частици, като например нуклоните – от кварки. Но те могат да бъдат и безструктурни като фотона, неутриното и кварките. В този случай те се наричат *фундаментални частици*.

Съществуват множество класификации на елементарните частици в зависимост от различни признаци или стойности на някои техни характеристики. Например: частиците могат да бъдат *стабилни* (електрон, протон) и *нестабилни* (мезони, хиперони). Неутронът е стабилен в ядрото, но е нестабилен в свободно състояние с време на живот около 13 min. Нестабилните се характеризират с време на живот $< 10^{-20}$ s. Частиците с време на живот 10^{-23} s се наричат резонанси.

- В зависимост от стойността на спина частиците се подчиняват на различна статистика – с цял спин са *бозони*, а с полуцял – *фермиони* (§15.2).
- Дадена частица има съвкупност от заряди (не само електрически – това ще стане ясно по-нататък). Почти на всяка частица съответства такава с противоположен знак на заряда – тя се нарича *античастица*.

Античастицата на електрона е позитронът, на протона е антипротонът и др. Ако частицата няма никакви заряди, тя съвпада със своята античастица и се нарича *истински неутрална* – например фотон.

Най-физична е класификацията по начина на взаимодействие. Гравитационното взаимодействие между елементарните частици е много малко в сравнение с другите взаимодействия. Затова то не се отчита, макар че всички частици го изпитват. Взаимодействието на частиците с макротелата е експериментален факт (например изкривяването на траекторията на бавни неутрони в земното гравитационно поле). Електромагнитното взаимодействие също играе ограничена роля (но понякога в реакции на слабо взаимодействие ролята е съществена; те няма да бъдат разглеждани в този увод във физиката на елементарните частици). Остават определящи слабото и силното взаимодействие (§ 20.2). Скоростите на взаимодействия при тях рязко се отличават едни от други и еднозначно определят два класа взаимодействия.

Частиците, които участват само в слабото взаимодействие, са *частиците преносители* (наричат ги още калибровъчни частици, а някои автори – exchange particles (обменни частици); подробно за тях ще стане въпрос по-нататък) и *лептоните*.

Частиците, изпитващи силното взаимодействие, се наричат *адрони*. Днес са познати два вида такива – *мезони* и *бариони*. В превод (от

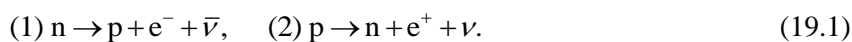
гръцки) термините „барион“, „мезон“ и „лептон“ означават съответно тежки, промеждутъчни и леки. При началната систематизация на елементарните частици като главен признак е използвана масата им – за известните тогава частици тези термини са отговаряли на действителността. Днес физиката отхвърли класификацията по маса, макар и да запази названието на групите. През 1975 г. е открита τ -частицата (тау-лептонът), която е два пъти по-тежка от протона. Много от откритите мезони имат значително по-големи маси от барионите.

През 1964 г. американските физици Дж. Цвайг (G. Zweig) и М. Гел-Ман (M. Gell-Mann) независимо предположили, че адроните се състоят от три силно взаимодействащи частици. С лека ръка Гел-Ман нарекъл тези частици *кварки* (q) и това название се е запазило до днес. *Кварките са фундаментални частици* – те нямат вътрешна структура. Фундаменталните частици нямат съставящи в себе си. Кварките са частици, които въпреки дългите и упорити експериментални търсения никой не е наблюдавал в свободно състояние. Докато атомите, ядрата, протоните, неутроните и лептоните могат да бъдат наблюдавани в експеримента като свободни частици, то кварките никога не могат да избягат от затвора на адроните, на образуванието от тях частици. Опитите по разсейване на електрони от протони показват, че протонът има структура. Счита се, че кварките не съществуват в свободно състояние и е прието, че има шест вида кварки, или – кварки с шест аромата. Ароматът означава определена съвкупност от квантови числа (електричен заряд, барионен заряд, странност и т.н. – вж. § 20.3). От тези фундаментални частици се състоят стотиците адрони.

Движението на елементарните частици се описва със СТО (гл. 1) и квантовата механика. Такова обединение води до извода, че за всеки тип частица съществува частица от друг тип със същите механични свойства, но с противоположен заряд – *античастица* на първоначалната. Античастицата на електрона се нарича *позитрон* (e^+). Теоретически е предсказана от Дирак, когато получил знаменитото си релативистко уравнение за електрона. Експериментално позитронът е открит през 1932 г. от Андерсън. Когато електронът и позитронът се сблъскват, те анихилират, като най-често масата им се превръща в електромагнитно поле. Обратно, при определени условия тази двойка може да се образува от електромагнитното лъчение.

Античастицата на протона се нарича *антипротон* (\bar{p}). Тя може да се получи заедно с протона, когато се ражда тази двойка (аналогично на електрон-позитронна двойка).

В гл. 18 във връзка с β -разпадането споменахме предположението на Паули за съществуване на неутрино. Приведохме реакциите за β -разпадането на неутрона (18.10) и на протона (18.14). Експериментално неутрино е открито от Коен и Райнес ([2, § 56]). Те са наблюдавали антинеутрино в реакцията (18.10). Аналогична реакция протича и с неутрино (18.14). Да покажем още веднъж тези реакции:



Изненадващ бил фактът, че реакции, аналогични на (19.1), но със замяна на антинеутрино с неутрино в реакция (1) и на неутрино с антинеутрино в реакция (2), не протичат. Това показва, че неутрино и антинеутрино са две различни частици.

Неутронът и неутрино не нямат електрични заряди. Въпреки това антинеутронът \bar{n} и антинеутрино $\bar{\nu}$ съществуват. Тези античастици се отличават от своите частици не по електричния заряд, а по други характеристики, за които ще говорим по-късно.

Четирите частици – електронът, протонът, неутронът и неутрино, известни до 1935 г., са достатъчни за формите на веществото. Необходимостта от съществуването на други наблюдавани частици не е съвсем ясна. Тези частици не са съставни части на обикновената материя, но те също са с фундаментално значение, както и четирите основни елементарни частици, особено в ранната Вселена.

Накрая да сумираме какви представи за обекти и явления въведохме качествено в този параграф за СМ: елементарни частици, нуклони, кварки, фундаментални частици, античастици (позитрон, антипротон и антинеутрино), фундаментални взаимодействия, лептони и адрони (мезони и бариони), електричен заряд, барионен заряд и странност.

§ 19.2. ФУНДАМЕНТАЛНИ ЧАСТИЦИ НА ВЕЩЕСТВОТО

Всички частици на веществото могат да бъдат сведени до комбинации от дванадесет съставляващи. Тези дванадесет частици са показани в табл. 19-1.

Таблица. 19-1. Фундаменталните частици на веществото

Лептони	Означение	Кварки	Означение
Електрон	e	Горен	u
Електронно неутрино	ν_e	Долен	d
Мюон	μ	Странен	s
Мюонно неутрино	ν_μ	Очарован	c
Таон	τ	Красив	b
Таонно неутрино	ν_τ	Истински	t

Дванадесетте частици са разделени на две различни групи, а именно лептони и кварки. Има шест лептона. Те са електрон, електронно неутрино, мюон, мюонно неутрино, таон и таонно неутрино. Имената им показват, че свойствата им са свързани. Шестте кварка (по увеличаване на масите) са горен, долен, странен, очарователен, красив и истински. Символите произлизат от английските думи up, down, strange, charm, beauty и truth. Понякога b- и t-кварките ги наричат botton- и top-кварки.

Познатата ни частица е електронът. Той е съставляваща на атома и е отговорен за електричния ток. Той е фундаментална частица и не се състои от други по-малки частици.

Изненадата за начинаещите е, че протоните и неутроните не са споменати в таблицата. Ние вече знаем, че всички атоми се състоят от отрицателно заредени електрони и положително заредено малко тежко ядро. А последното е съставено от протони и неутрони. И тъй като зарядът на протона има същата стойност като зарядът на електрона, неутралният атом съдържа същия брой протони в ядрото си като електроните около него. Но за начинаещите не само това е изненада. Както някога хората са вярвали, че атомът е фундаментален и по-късно откриват, че се състои от протони, неутрони и електрони, така и ние днес знаем, че протоните и неутроните не са фундаментални. Те се състоят от кварки (подробностите са изложени в § 20.2). Но да подчертаем още веднаж, че електроните са фундаментални частици.

От теорията и експеримента следва, че показаните елементарни частици се състоят от фундаменталните частици с полуцял спин – наричат се *фундаментални фермиони*. Класът им е образуван от *шест лептона* (посочените три двойки лептони) и *шест кварка* (табл. 19-1). Размерът на кварките е по-малък от 10^{-17} m. Таблица 19-2 дава добра представа за фундаментални фермиони и техните групи (поколения).

Таблица 19-2. Групиране на фундаменталните фермиони

Поколения от фундаментални фермиони			Електричен заряд в e
I	II	III	
ν_e	ν_μ	ν_τ	0
e	μ	τ	-1
u	c	t	2/3
d	s	b	-1/3

Зарядите на хоризонтално разположените частици са еднакви. Разликата между зарядите на неутрината и лептоните е равна на разликата между зарядите на *горните кварки* (u, c и t със заряд $2/3e$) и *долните* (d, s и b със заряд $1/3e$). Всяко поколение съдържа по 4 частици. Най-леките образуват I поколение. Частиците в следващото поколение са по-тежки от тези в предходното. На основата на симетрията на фермионите са предсказани c-кваркът (1964 г.), b- и t-кварките (1975 г.). Важността на симетричното групиране (табл. 19-2) на фундаменталните фермиони се демонстрира с факта, че истинският t-кварк експериментално е открит едва през 1995 г. Дотогава там не е имало нищо. Съвкупността от фотони и фундаментални фермиони от I поколение изграждат веществото на Вселената. А фермионите от II и III поколение са играли важна роля в ранната Вселена.

Лептонът електрон ни е познат. Той ни помага да изучим останалите лептони, т.к. неговите свойства са отразени в тях. Много малко неща, освен масата, различават електрона от мюона и таона. От таблицата се вижда, че всичките имат еднакъв електричен заряд. Освен това те отговарят на фундаменталните сили (вж. § 19.5) по подобен начин. Съществената разлика е, че мюонът и таонът позволяват разпадането на други частици. А електронът е винаги стабилен. Лептоните формират забележителна съвкупност: три частици e, μ и τ и три неутрина ν_e , ν_μ и ν_τ , всички със своите античастици. Експерименталните факти

показват, че те са фундаментални частици. И експериментално е доказано през 1989 г. че има само три неутрина, т.е. три лептонни поколения.

Трите частици, свързани съответно с електрона, мюона и таона, се наричат неутрина (малки неутрони), защото са неутрални. Това не е същото като да кажем, че неутронът има нулев заряд. (Както ще видим по-надолу, неутронът се състои от три кварка, всеки от които има електричен заряд. Неутронът от известно разстояние изглежда като неутрален обект, тъй като зарядите на трите кварка взаимно се компенсират, или с други думи, сумарният им заряд е нула. Експериментално е установено наличието на заредени обекти в неутрона). Неутриното обаче е фундаментална частица. То няма компоненти вътре в себе си. Казано на обикновен език, то е генетично неутрално. Разликата в нулевия заряд между двете *частици* (неутриното и неутрона) можем да изразим, като ги наричаме съответно *неутрално* неутрино и неутрон с *нулев заряд*.

Неутриното има или изключително малка маса (даже за скалата на атомната маса) или въобще няма маса. Експериментите с електрон и неутрино показват, че масата на неутриното е по-малка от една десетохилядна от масата на електрона ($m_\nu < 10^{-4} m_e$). Много физици (по елементарни частици) смятат, че неутриното въобще няма маса. Естествено е да попитаме, след като то няма електричен заряд и маса, въобще съществува ли. В стандартния модел се приема, че неутрината са безмасови.

Подчертахме, че нуклоните са *изградени от кварки*. Протонът е съставен от два горни кварка и един долен кварк, а неутронът – от два долни и един горен:

$$p \equiv uud, \quad n \equiv udd. \quad (19.2)$$

Протонът има електричен заряд $+e$ (зарядът на електрона с обратен знак $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$) и би трябвало поне някои от кварките да са заредени. Подобни кварки се съдържат и в неутрона. Ако разпишем зарядите от равенството, получаваме уравнения за зарядите на u- и d-кварка. Като означим заряда на u-кварка с Q_u , а на d-кварка – с Q_d , имаме

$$\begin{aligned} p(uud) \text{ заряд} &= Q_u + Q_u + Q_d = +e, \\ n(udd) \text{ заряд} &= Q_u + Q_d + Q_d = 0. \end{aligned} \quad (19.3)$$

Или за зарядите Q_u и Q_d на u- и d-кварка получаваме съответно:

$$Q_u = +2/3e, \quad Q_d = -1/3e. \quad (19.4)$$

Кварките имат заряди $+2/3e$ или $-1/3e$. В стандартния модел има три основни стойности за заряд $+2/3e$ (горни кварки), $-1/3e$ (долни кварки) и $-e$ (електрони). Кварките в даден стълб се отнасят към отделно *поколение*. Случайно поколенията са свързани с реда на откриване на кварките, но техният физичен смисъл е свързан с начина, по който те отговарят на фундаменталните сили.

При експерименталното откритие на променливите бозони W^+ , W^- и Z^0 (за тях и откритието по-нататък в § 19.5) и анализа на времето за живот на Z^0 е установено сигурно, че има само три поколения фундаментални фермиони.

Накрая да сумираме какви представи за обекти и явления въведохме качествено в този параграф за СМ: 12 фундаментални частици, фундаментални фермиони, поколенията им, симетрия на фундаменталните фермиони, горни и долни кварки, три неутрина, безмасово неутрино и заряд на кварките.

§ 19.3. АНТИЧАСТИЦИ

В предсказаната от Дирак и експериментално потвърдена от Андерсън частица почти всичко е както в електрона (масата, спина и т.н.), но зарядът е положителен. Тази частица е наречена позитрон. После се потвърждава теоретично и експериментално, че на всяка частица с определен електричен заряд съответства частица със същите характеристики, но с противоположен заряд. Нещо повече, опитът посочва, че елементарните частици имат вътрешно присъщи свойства, които са противоположни. Те били наречени заряди по аналогия с електричния – лептонен заряд и барионен заряд. Оказва се, че на всяка частица съответства друга, която се различава само по заряда – или електричен, или лептонен, или барионен. Такива частици били наречени *античастици*. Тъй като с електричния заряд сме запознати, ще отговорим как физиците са били принудени да въведат лептонен и барионен заряд.

Електронът, мюонът и таонът са подобни частици. Но те имат силно различаващи се маси. Тази разлика позволява да ги поставим в различни поколения. Но положението с неутрината е съвсем различно (поне днес). Те са неуловими – нямат маса според стандартния модел (съществува съмнение, че те имат много малка маса), нямат електричен заряд, нямат радиус и не се влияят от силното взаимодействие. Много трудно можем да кажем каква е физичната разлика между тях. Обаче в своите експерименти Ледерман (Lederman) през 1961 г. убедително доказва, че има разлика между електронното (ν_e) и мюонното (ν_μ) неутрино. Така че би трябвало да има свойство, което да различава неутрината. Очевидно е, че има вътрешно, съществено свойство, което не можем да измерим с никакви известни досега начини (например такива, които използваме за измерване на енергията, масата или заряда). За лептоните се въвежда *лептонно квантово число*, което съответства на *лептонния заряд* (употребява, макар и рядко, *вътрешно присъщо* или *съществено свойство*). Съществуват три различни лептонни заряда: електронен L_e , мюонен L_μ и таонен L_τ : за електрона и електронното неутрино $L_e = +1$, за мюона μ^- и мюонното неутрино $L_\mu = +1$, за таона τ^- и тау-неутриното – $L_\tau = +1$ (табл. 19-3). За частиците, които не са

Таблица 19-3. Лептонни заряди

Лептони	Електронен	Мюонен	Таонен
Електрон e	1	0	0
Електронно неутрино ν_e	1	0	0
Мюон μ	0	1	0
Мюонно неутрино ν_μ	0	1	0
Таон τ	0	0	1
Таонно неутрино ν_τ	0	0	1

лептоли – например кварките, $L_i = 0$, $i = e, \mu, \tau$.

Тук му е мястото да отбележим, че лептонните заряди (лептонните квантови числа) различават поколенията – за първото поколение $L_e = 1$, за второто – $L_\mu = 1$, а за третото $L_\tau = 1$. Но тези заряди не различават лептона от неговото неутрино. По-горе „изобретихме“ лептонните заряди като квантови числа, които отличават поколенията. Има две условия, че те са реални, а не „изобретение“ на нашето въображение:

- Да се демонстрира, че в реакциите лептонният заряд се запазва;
- Запазването на лептонния заряд ни обяснява реакции, които не разбираме, и предсказва нови.

Да разгледаме реакцията



В този случай сумарният електронен заряд L_e и сумарният мюонен заряд L_μ поотделно са едни и същи преди и след реакцията:

$$\begin{aligned} \nu_\mu + e^- &\rightarrow \mu + \nu_e, \\ L_e \quad 0 + 1 &= 0 + 1, \\ L_\mu \quad 1 + 0 &= 1 + 0. \end{aligned} \quad (19.6)$$

Можем да приведем и много други реакции, илюстриращи запазването на лептонния заряд. (Смяташе се, че запазване на лептонното число е фундаментален закон и е аналогичен на закона за запазване на зарядовото число. Напоследък бяха открити осцилации на лептонното число (тук въпросът не се анализира, а се разглеждат анализът и начинът на мислене на физиците преди откриването им; посочените реакции са потвърдени теоретично и експериментално). Първото по-горе условие за запазване на лептонното число се изпълнява. Но в някои реакции като че ли запазването не се изпълнява и те изглеждат необясними. Пример – реакцията, послужила за предположението, че съществува нова частица и по-късно потвърденото експериментално неутрино – разпадане на неутрона. Когато е изолиран, той е нестабилен. Вътре в ядрото е стабилизиран от нуклоните. Преди да се открие неутриното, реакцията е изглеждала така:



Тъй като неутронът и протонът са съставени от кварки, тази реакция се дължи на по-основната кваркова реакция

$$d \rightarrow u + e^{-}. \quad (19.8)$$

Ако проследим електронния лептонен заряд за реакцията, ще получим

$$\begin{aligned} d &\rightarrow u + e^{-}, \\ L_e & 0 \neq 0 + 1. \end{aligned} \quad (19.9)$$

В реакцията електронният лептонен заряд не се запазва. Исторически нещата са по-други. За да обясни непрекъснатата енергия на електрона в (19.8) Паули предполага, че в реакцията се отделя нова частица, която е наречена неутрино (вж. § 18.2.2):

$$\begin{aligned} d &\rightarrow u + e^{-} + \nu?, \\ L_e & 0 = 0 + 1 + -1. \end{aligned} \quad (19.10)$$

Ние неслучайно поставихме въпрос до неутриното. За да бъде съблюдавано запазването на L_e , трябваше да предположим, че електронният му заряд е $L_e = -1$. Сравнението с табл. 19-3 показва, че това неутрино изглежда доста мистериозно. Ще продължим да си имаме работа с това мистериозно неутрино в един възможен експеримент, без да обсъждаме начина, по който то се получава:

$$\nu? + p \rightarrow n + e^{+}. \quad (19.11)$$

В реакцията се получава частица, открита от Андерсън (§17.1), която се различава от електрона само по положителния електричен заряд – позитрон. Той има противоположен електричен заряд на електрона. И ако искаме да запазим предположението $L_e = -1$ за електронния лептонен заряд на мистериозното неутрино, трябва да припишем на позитрона и противоположен електронен лептонен заряд $L_e = -1$:

$$\begin{aligned} \nu? + p &\rightarrow n + e^{+} \\ L_e & -1 + 0 = 0 + -1. \end{aligned} \quad (19.12)$$

Протонът и неутронът имат лептонно число 0, тъй като те са съставени от кварки (19.2). Видяхме, че има частици с противоположен лептонен заряд на познатите ни лептони. Те са *античастици*. Означават се с черта отгоре – антиелектронно, антимюонно и антитаонно неутрино. Тези обекти с $L_e = -1$ са частици на *антивеществото* (то е изключително рядко във Вселената; не се знае защо няма еднакви количества вещество и антивещество). По аналогия с двойката електрон–позитрон съществуват античастици на муона – антимюон μ^{+} , и на таона – антитаон τ^{+} . Фундаменталните лептони и техните античастици са представени в табл. 19-4.

До тук се занимавахме с вътрешно свойство на лептоните. Естествен е въпросът и за вътрешно свойство на кварките. Подчертахме, че лептон

Таблица 19-4. Разширение на фундаменталните лептони с техните античастици

Поколения от фундаментални лептони			Лептонно кв. число
I	II	III	
e	μ	τ	+1
ν_e	ν_μ	ν_τ	
e^+	μ^+	τ^+	-1
$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	

ното им число е нула, т.е. те нямат лептонно число, т.е. нямат вътрешно свойство лептонен заряд. Но те имат друго вътрешно свойство, наречено *барионен заряд* или *барионно квантово число* – B . Всички кварки имат барионен заряд $B=1/3$. (Прави впечатление, че лептоните имат 3 различни лептонни заряда, а кварките само един; това се дължи на слабото взаимодействие, което разглеждаме по-нататък – то не разделя така пълно кварковите поколения, както – поколенията на лептоните. Ако лептоните не бяха така строго разделени на поколения от слабото взаимодействие, тогава биха имали само едно лептонно число, а не 3 – положението би било същото както с барионния заряд на кварките.)

Две неща изглеждат странно – защо свойството е наречено барионен заряд, а не кварков и защо барионното число е $1/3$, а не 1? То е присвоено преди откриването на кварките. В § 19.1 споменахме за адроните, които участват в силните взаимодействия – те биват мезони и бариони. За обяснение на експерименталния факт, че в реакциите разликата между броя на барионите и на антибарионите остава постоянна преди и след реакцията, се въвежда квантовото число *барионен заряд* B . На даден барион се присвоява заряд $B=1$, на всеки антибарион – $B=-1$, а на мезоните – $B=0$. Така че въвеждането на барионния заряд е независимо от името „кварк“.

Към горното ще добавим, че отначало B е въведено за протона като $B=1$. Тъй като той съдържа три кварка (§ 19.1), всеки кварк има барионно число $B=1/3$ – сумарното барионно число на протона е сбор от барионните числа на съставлящите го кварки. Единствената възможност за барионните числа на фундаменталните частици е $B=1/3, 0, -1/3$. За кварките $B=1/3$, за лептоните $B=0$ и $B=-1/3$ е за *антикварките*. Всеки кварк има свой партньор – антикварк, също както при лептоните (табл. 19-5).

Таблица 19-5. Разширение на фундаменталните кварки с техните античастици

Поколения от фундаментални кварки			Барионно кв. число
I	II	III	
u	c	t	+1/3
d	s	b	
\bar{u}	\bar{c}	\bar{t}	-1/3
\bar{d}	\bar{s}	\bar{b}	

Да сумираме какви представи за обекти и явления въведохме в този параграф за *стандартния модел*: античастици, лептонен заряд = лептонно квантово число, три различни лептонни заряда (електронен, мюонен и таонен), запазването на лептонния заряд, позитрон, фундаментални лептони и антилептоли, барионен заряд и антикварк.

§ 19.4. ЧЕТИРИТЕ ФУНДАМЕНТАЛНИ СИЛИ

Някои сили може да бъдат обяснени с възникването от действието на друга сила. Силите възникват от фундаменталните сили. *Фундаменталните сили* не могат да бъдат обяснени с възникването от действие на по-основни сили. Например триенето съществува благодарение на електромагнитните сили. Без електромагнетизъм не би съществувало триене. То не е фундаментална сила. Но електромагнитните сили са фундаментални. СМ признава четири основни (в него фундаментални) сили, с които могат да се обяснят всички сили в природата:

- гравитационни,
- електромагнитни,
- сили на слабото взаимодействие,
- сили на силното взаимодействие.

(Ние кратко ги засегнахме в § 17.3.) Експериментите показват, че тези сили действат по съвсем различен начин при всякакви енергии, които са постижими днес. Физиците вярват, че при много високи енергии, характерни за съвсем ранната Вселена, е съществувала една-единствена сила на природата, по-фундаментална от посочените по-горе четири сили и те произхождат от нея.

Гравитационните и електромагнитните сили са добре известни. Слабите и силните сили са открити неотдавна. Може би основната причина е, че те действат на много малки разстояния в предела на незначителна за ежедневните представи граница. На по-големи разстояния те стават толкова малки, че не могат да бъдат регистрирани. Границата на силното взаимодействие е 10^{-15} m, а тази на слабото взаимодействие – 10^{-17} m. Диаметърът на атома е около 10^{-10} m, така че тези сили действат на разстояния, по-малки от атомните размери. Да започнем със *силите на силното взаимодействие (силни сили)*.

В §19.2 разделихме фундаменталните частици на лептони и кварки въз основава на взаимодействието. Силното взаимодействие действа само на кварките. – то не действа на лептоните. Лептоните са слепи към силните сили, както неутралните частици са слепи към електромагнитните сили. Наличието и отсъствието на силното взаимодействие е главната разлика в свойствата на кварките и лептоните. Да подчертаем пак – *кварките участват в силното взаимодействие, но лептоните не участват*. Ще добавим, че кварките и лептоните участват в другите три фундаментални взаимодействия.

Силните сили принуждават кварките да се свързват заедно и да формират други частици. Лептоните, които не ги усещат, не формират частици.

Съществуващата теория на силното взаимодействие предполага, че е невъзможно да се изолира отделен кварк от други кварки. В §20.2 ще се убедим, че всички кварки във Вселената са свързани в други елементарни частици – по два или по три кварка. Потенциалната енергия между кварките нараства с увеличаване на разстоянието между тях. И за да отдалечим един кварк от друг, трябва да приложим безкрайно количество енергия. Всеки опит да раздалечим един кварк от друг завършва с две образувания от два кварка. Аналогията с

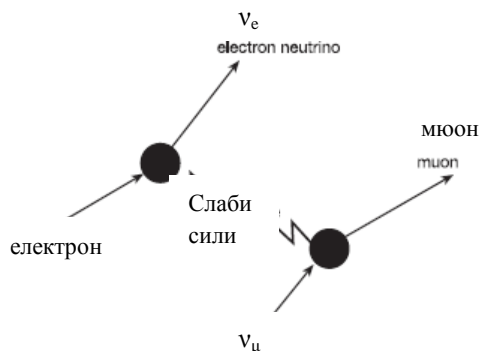
класическата физика ни помага да си представим ситуацията. При отдалечаване на единия край на пружина с два края тя се къса и получаваме не два края, а две пружини с по два края. При опит да отдалечим единия полюс на магнита (с два полюса) получаваме не магнитен монопол, а два магнита с по два полюса. Благодарение на силното взаимодействие кварките не само теоретично не могат да съществуват в свободно състояние. Въпреки дългите и упорити експериментални търсения, никой не ги е наблюдавал и това, че никой не е наблюдавал свободен кварк, е послужило за създаване на хипотезата за задържане. Тя се нарича хипотеза на кнфаймента (от англ. confinement: у нас се нарича заточение, а в руската литература – плен).

След краткото качествено запознаване със силите на силното взаимодействие да преминем към *силите на слабото взаимодействие* (понякога ще ги наричаме *слаби сили*).

Много е трудно да си представим слабите сили, използвайки нашето въображение даже за другите три фундаментални сили. Тях можем да ги опишем като привличане или като отблъскване. Но категориите „привличане“ и „отблъскване“ реално са почти неприложими за слабите сили. Това е така, защото те просто променят частиците от един вид в друг. Именно слабата сила създава структури от кварки и лептони, т.е. нови частици от тях. Тя действа както на лептоните, така и на кварките (силните сили действат само на кварките). Подобно е положението при гравитационната (действа на всички частици) и електромагнитна сила (действа само на заредени).

Пример за действието на слабата сила (фиг. 19.2) е реакцията

$$e + \nu_{\mu} = \mu + \nu_e. \quad (19.13)$$

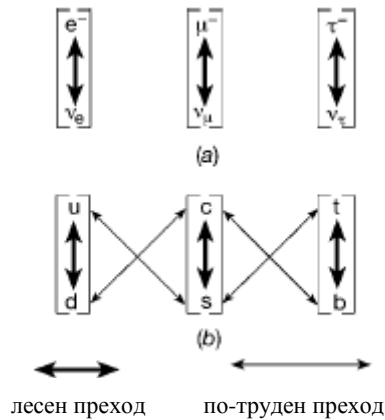


Фиг. 19-2. Илюстрация на слабото взаимодействие.

От реакцията се вижда, че слабата сила променя частица (лептон) от един вид в друг. Но тя може да променя лептоните от един вид в друг само *вътре в същото поколение* – в случая електрон в електронно неутрино и мюон в мюонно неутрино. Слабото взаимодействие се осъществява вътре в лептонните поколения, но не и между тях.

С кварките в много отношения действието на слабата сила е подобно. Също както при лептоните слабата сила може да превърне

един кварк в друг и действа вътре в поколенията. Но при кварките тя може да действа и между поколенията, макар и със значително по-малък ефект (фиг. 19-3).



Фиг. 19-3. Слабото взаимодействие: (а) при лептони; (б) при кварки.

Да обобщим:

– слабото взаимодействие може да превърне една фундаментална частица в друга – но в случая на лептони то действа само вътре в поколенията, а в случая на кварките действа преимуществено вътре в поколенията;

– слабото взаимодействие не може да превърне кварка в лептон и обратно.

Да сумираме какви представи за обекти и явления въведохме в този параграф за **стандартния модел**: четири фундаментални сили гравитационни, електромагнитни, сили на слабото взаимодействие, сили на силното взаимодействие; **силно взаимодействие** (кварките участват в силното взаимодействие, но лептоните не), **слабо взаимодействие** (лептоните и кварките участват в слабото взаимодействие) – това взаимодействие променя лептоните и кварките от един вид в друг; то се осъществява *вътре в лептонните поколения*, но не и между тях, а при кварките то действа *и между поколенията*, но по-малко ефективно.

§ 19.5. ПРЕНОСИТЕЛИ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕТО

С пренасянето на фундаменталните взаимодействия от частици се запознахме в § 17.3. Тези частици са *фундаментални бозони*. Фундаментални са, защото нямат вътрешна структура и бозони, защото спинът им е равен на единица (по \hbar). *Всички процеси в света на елементарните частици се свеждат до взаимодействие между фундаменталните фермиони, което се осъществява чрез обмен на фундаментални бозони (преносители)*. Преносителите на

взаимодействие се раждат от едната от взаимодействащи частици и се поглъщат от другата. Отбелязахме, че те са виртуални. Радиусът на взаимодействието е равен на комптъновата дължина на вълната \hbar / mc .

Подчертахме, че преносителят на гравитационното взаимодействие – *гравитонът*, не е наблюдаван експериментално. Преносител на електромагнитното взаимодействие е безмасовият *фотон* – квантът на електромагнитното поле (осигурява взаимодействието между зарядите).

Преносители на слабото взаимодействие са тежките (с маса $\sim 100 \text{ GeV}$) *промеждутъчни бозони* W^+ , W^- и Z . Те са открити в ЦЕРН от екип на К. Рубиа (К. Rubbia). За това откритие Рубиа и Ван дер Миер (Van der Meer) получават Нобелова награда (1984 г.) При слабите взаимодействия се излъчват (поглъщат) *промеждутъчните бозони* – те са квантите на полетата на слабото взаимодействие. При излъчване (поглъщане) на зареден бозон от зареден лептон лептонът се превръща в съответното неутрино в рамките на едно поколение лептони и неутрина. Обратно – неутрино се превръща в съответния му зареден лептон. Слабите взаимодействия са универсални, защото тези бозони се излъчват (поглъщат) и от лептоните, и от кварките. Горният кварк се превръща в долен или обратно. Важното е, че *всеки* от горните кварки (u, c, t) се превръща във *всеки* от долните (d, s, b) (и обратно). Разпадането на неутрона на протон се свежда към превръщането на d-кварк в u-кварк:

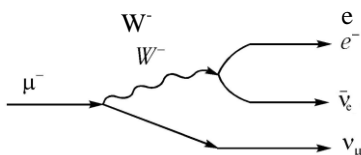
$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (19.14)$$

при което се излъчва W^- -бозон, който се превръща в двойката $e^- + \bar{\nu}_e$. Да илюстрираме казаното с диаграмите на две разпадания.

Първата диаграма за β -разпадането на отрицателния мюон μ^-

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (19.15)$$

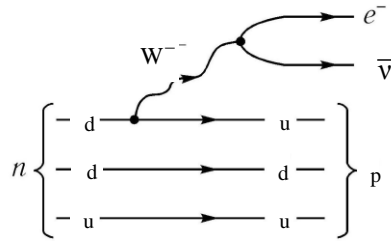
е показана на фиг. 19-4. Мюонът излъчва W^- -бозон и неутрино ($\mu^- \rightarrow W^- + \nu_\mu$), а след това W^- -бозонът се разпада на двойката ($e^-, \bar{\nu}_e$).



Фиг. 19-4. Разпадане на отрицателния мюон с участието на W^- -бозона.

На фиг. 19-5 е показана втората диаграма (разпадането на неутрона)

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (19.16)$$



Фиг. 19-5. Разпадане на нейтрона с участието на W^- -бозона.

с участието на W^- -бозона: d-кваркът излъчва W^- -бозон и се превръща в u-кварк ($d \rightarrow W^- + u$), а после W^- -бозонът се разпада на e^- и $\bar{\nu}_e$.

При енергии, много по-големи от енергията, съответстваща на масата на променливите бозони (~ 100 GeV), електромагнитното и слабото взаимодействие се обединяват в едно взаимодействие – в *електрослабо взаимодействие*. Как се е стигнало до очакването, че кварките изпитват електрослабо взаимодействие? Много от адроните, за които е характерно силното взаимодействие, имат електричен заряд. Това означава, че те участват в електромагнитните взаимодействия. Освен това адроните участват и в слабите взаимодействия (типичен пример е разпадането на нейтрона). Но адроните са съставени от кварки. Следователно можем да очакваме, че кварките изпитват двете взаимодействия – електромагнитното и слабото. През 1960-1970 г. трима физикаци – Глешоу (Glashow), Уайнбърг (Weinberg) и Салам (Salam), създават теория за описанието на тези две взаимодействия. По-късно (1979 г.) те за това получават Нобелова награда по физика. В тяхната теория двата вида взаимодействия, които дълго време се считаха несвързани едно с друго, т.е. независими, се обединяват в едно взаимодействие – електрослабо. В новата теория електромагнитното поле и полето на слабото взаимодействие са различни компоненти на едно поле, което има четири кванта – γ, W^+, W^-, Z^0 (бозони). В реалния днешен свят (ниски енергии) симетрията между тези бозони е нарушена и три от тях (променливите бозони) – W^+, W^-, Z^0 , придобиват маса, а един (фотонът) остава безмасова частица. Съвсем неотдавна на Големия адронен колайдър (LHC) [вж. Л1, прил. XVII] в ЦЕРН бе открит Хигс-бозонът – при взаимодействието с полето, което той създава, частиците W^+, W^- и Z^0 получават маса (идеята е на П. Хигс (P. Higgs)). (Границата на слабото взаимодействие е 10^{-17} m и причината за това късо действие е именно масата на преносителите променливи бозони).

И накрая да кажем с няколко думи, че в квантовата електродинамика и в квантовата теория на полето *частиците-преносители се разглеждат като смущения на съответното поле* – фотоните на електромагнитното поле, гравитоните на гравитационното поле, променливите бозони W^+, W^- и Z^0 на слабото поле и глюоните на силното поле, а Хигс-бозонът е смущение на Хигс-полето

(да подчертаем, че слабото поле има три смущения, а например електромагнитното само едно – фотона). Хигс-полето *не създава сили както другите четири полета създават фундаменталните сили, но то взаимодейства със слабото поле. Именно при това взаимодействие частиците W^+ , W^- и Z^0 обменят с него енергия* – резултатът от това е, че те получават маса. Хигс-полето винаги присъства, но не може да се „види“, така че ние никога не можем да проведем експеримент без него и да наблюдаваме безмасово смущение Z^0 . Теоретично дълго време се предполагаше съществуването на Хигс-бозона, но за експерименталната проверка бе необходим ускорител (и то колайдър) с много висока енергия – Хигс-бозонът е открит при 125 GeV.

При енергии, много по-големи от 100 GeV (това е енергетичният еквивалент на масата на тежките промеждутъчни бозони), симетрията се възстановява и четирите кванта на полето са безмасови.

Преносители на силното взаимодействие са *глуоните* – това са квантите на осем глюонни полета (те осигуряват взаимодействието между кварките). Глуоните като фотоните са безмасови частици, но за разлика от тях те могат да си взаимодействат един с друг и с кварките (фотоните не взаимодействат със заредените частици). Нека към това да добавим и факта, че незаредените частици – гравитоните (§ 17.3 – гравитационното взаимодействие е много слабо) и неутриното, взаимодействат слабо. От друга страна, електромагнитното и силното взаимодействие са много интензивни (вж. пак там). Всичко това ни кара да се усъмним и си зададем въпроса, дали освен електричните заряди в субядрения свят няма и друго различие – друг вид заряди. (Нашето съмнение ще се усили в гл. 20, когато внимателно разгледаме табл. 20-1. В нея има бариони, състоящи се от три еднакви кварки. Например Ω^- -хиперонът – от три sss-кварка и неговият спин е $3\hbar/2$. Това е възможно, ако спиновете на трите s-кварка (всеки има спин $\hbar/2$) са паралелни, т.е. трите кварка са в едно и също състояние, което е крещящо нарушение на принципа на Паули.

Различието се описва с допълнително квантово число, което може да приема три стойности. Тези три квантови числа съответстват на някакви други, не електрични заряди. Било предложено тези заряди да се наричат *цветни заряди, а квантовото число – цвят* и той да приема три стойности: R (red – червен), G (green – зелен) и B (blue – син). Както електричните заряди са източник на електромагнитното поле, така и цветните заряди се явяват източник на глюонните полета. Антикварките притежават съответно цветовете \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} (античервен, антизелен, антисин). Като отчетем, че всеки аромат може да има три цвята, е ясно, че съществуват 18 кварка и 18 антикварка. Счита се, че съвкупността от трите цвята става бяла, а двойката кварк-антикварк има „скрит“ цвят (например $R\bar{R}$).

Всеки глюон (квант на определено глюонно поле) е оцветен, т.е. той е зареден с цвят и затова участва в силното взаимодействие – всички глюони

взаимодействат с кварките и помежду си. Съществуват 8 различни глюона: 6 оцветени ($g_{R\bar{G}}, g_{R\bar{B}}, g_{G\bar{R}}, g_{G\bar{B}}, g_{B\bar{R}}, g_{B\bar{G}}$) и 2 със скрит цвят.

С изучаването на силното взаимодействие на глюоните с кварките и помежду си (глюоните могат да се излъчват и поглъщат) се занимава *квантовата хромодинамика*. Електромагнитното взаимодействие е резултат от обмяната на фотони. При силните взаимодействия се обменят глюони, които имат цвят – оттук аналогията на названието квантова хромодинамика с квантовата електродинамика.

След безспорно големия успех на теорията на електрослабото взаимодействие (и експериментален) са създадени различни хипотези, обединяващи силното и електрослабото взаимодействие. Такива са например хипотезите за Великото обединение, наричани теории на Великото обединение (grand unified theories – GUT's). Горните взаимодействия могат да се обединят при изключително високи енергии ($> E \sim 10^{15} \text{ GeV}$) и да се проявяват като едно универсално. Преносителите на това взаимодействие са 24 векторни бозона. Първите 12 са познатите ни 8 глюона, 3 променливостни бозона W^+, W^-, Z^0 и фотонът. От останалите 12 половината са X- и Y-бозони, а другите 6 са античастиците им. Всеки един от тях е оцветен или в червено, или в зелено, или в синьо. Тези с електричен заряд $-4/3e$ се наричат X-бозони и се означават X_R, X_G и X_B . Бозоните с електричен заряд $-1/3e$ се наричат Y-бозони и се означават Y_R, Y_G и Y_B . Масите на X- и Y-бозоните са много големи и затова разпадането с тяхно участие е с много малка вероятност. Теорията предсказва, че протонът може да се разпадне за $10^{30} \div 10^{35}$ години. Днес се смята, че разпадането на протона се осъществява за време, по-голямо от 10^{32} години.

Стандартният модел на електрослабото и силното взаимодействие не може да бъде окончателна теория. Нека посочим само три неща защо. Подчертахме, че моделът приема масите на неутрината за нулеви, но експериментът показва, че макар и да са много малки, те са крайни. В модела има твърде много свободни параметри, които трябва да се уточняват от осреднени експериментални данни. Много важно е да отбележим, че в модела въобще не се разглежда гравитационната сила, която е доминираща сила във Вселената. Затова има много опити да се създаде теория на всичко (Theory of Everything – TOE), която да обединява всичките четири взаимодействия. Засега за такова глобално обединение най-обещаваща е *теорията на струните*, в която основното допускане е, че елементарните частици не са точкообразни, а едномерни струни. Различните осцилации (възбуждания) на струните представляват различни частици. Струнните теории (в частност суперструнните) са построени във високоразмерно пространство. Например *M-суперструнната теория* (M от Мембрана, Матрица, Мистерия или Майка на всички теории) има 11 размерности, 7 от които са с толкова малки размери, че не се наблюдават в природата. Може би част от гравитационните сили „изтичат“ в тези 7 размерности, докато

електрослабите и силните, напротив, си остават в обикновените 4 размерности. (Ако гравитацията наистина изтича в тези свръх-размерности, това би обяснило общоприетото съществуване на тъмната енергия (вж. [2, ch. 13])). М-суперструнната теория е *теория на супергравитацията (СУГРА)*.

Да обобщим какви представи за обекти и явления въведохме в този параграф за **стандартния модел**: преносителите са фундаментални бозони (фундаменталните фермиони си взаимодействат чрез обмен на фундаментални бозони); преносители на фундаменталните взаимодействия са: на гравитационното – *гравитонът*, на електромагнитното – *фотонът*, на слабото взаимодействие са тежките *промеждутъчни бозони*, на силното – *глюонът*; промеждутъчните бозони се излъчват (поглъщат) и от лептони, и от кварки, като лептоните се превръщат в съответното неутрино и обратно, а горните кварки в долни и обратно; при енергии, по-големи от енергията на масата на промеждутъчните бозони, електромагнитното и слабото взаимодействие се обединяват в едно електрослабо взаимодействие; при взаимодействието на Хигс-бозона с полето, което той създава, частиците получават маса; кварките имат цвят и се описват с 3 квантови числа = на 3 цветни заряда: R (red – червен), G (green – зелен) и B (blue – син); с изучаването на силното взаимодействие на глюоните с кварките и помежду си се занимава квантовата хромодинамика.

РЕЗЮМЕ

В съвременната физика се счита, че протоните и неутроните са изградени от кварки и в процесите в субатомния свят участват елементарните частици. Те са типично квантови обекти с много малки маси ($\leq 10^{-26}$ kg) и размери ($\leq 10^{-15}$ m). Почти всички съществуват за кратко време $\leq 10^{-20}$ s. Характеристиките и закономерностите на елементарните частици се оказват толкова необичайни, че за изтълкуването им квантовата механика не е достатъчна и се наложило разработването на квантовата електродинамика, на квантовата хромодинамика и на квантовата теория на полето.

Частиците, които нямат структура – фотонът, електронът, неутриното и кварките, се наричат фундаментални частици. В зависимост от стойността на спина те се подчиняват на различна статистика – тези с цял спин са бозони, а с полуцял – фермиони.

Частиците имат различни заряди. На всяка частица съответства частица с противоположен заряд и тя се нарича античастица – на електрона е позитронът (e^+). Античастицата на протона е антипротонът (\bar{p}). Неутриното и антинеутриното са две различни частици. Неутронът и неутриното нямат електрични заряди. Но антинеутронът \bar{n} и антинеутриното $\bar{\nu}$ съществуват. Те се отличават от своите частици не по електричния заряд, а по други характеристики.

Ако частицата съвпада със своята античастица (просто тя няма никакви заряди), тя се нарича истински неутрална.

Частиците, които участват само в слабото взаимодействие, са лептоните и частиците преносители. Частиците, които изпитват силно взаимодействие, са кварките и адроните.

Първата открита елементарна частица е лептонът електрон. Лептони с електричен заряд са електронът, мюонът и таонът. Позитронът, античастицата на електрона, теоретично е предсказан от Дирак и съществуването му по-късно е потвърдено експериментално. Мюонът има отрицателен заряд e , а античастицата μ^+ – положителен. Масата на мюона е $m_\mu = 106 \text{ MeV}$ (а на електрона е $0,5 \text{ MeV}$). През 1975 г. е открит тау-лептонът, който е два пъти по-тежък от протона. Неговата античастица е лептонът τ^+ . Неутриното също е лептон, но незареден. Съществуват три различни неутрина: електронно ν_e , мюонно ν_μ и таонно неутрино ν_τ . Съответстващите им антинейтрино са $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$ и $\bar{\nu}_\tau$.

Лептоните притежават лептонен заряд. Изследванията показват, че съществуват три различни лептонни заряда: електронен L_e , мюонен L_μ и таонен L_τ . Електроните, мюоните, таоните и трите неутрина имат лептонен заряд $+1$, а техните античастици -1 . Лептоните нямат вътрешна структура. Те са фундаментални частици. Те са фермиони.

Съществуват шест вида кварки, още казват – кварките имат шест аромата: горен (up) u , долен (down) d , странен (strange) s , очарован (charm) c , красив (beauty) b и истински (truth) t . Понякога b - и t -кварките ги наричат bottom- и top-кварки. Кварките u , c и d се наричат горни кварки (заряд $2/3e$), а кварките d , s и b – долни кварки (заряд $-1/3e$).

Теорията и експериментът показват, че елементарните частици се състоят от фундаментални частици с полуцял спин – те са фундаментални фермиони. Класът на фундаменталните фермиони е образуван от 6 лептона (3 двойки лептони: електрон e^- и електронно неутрино ν_e , мюон μ^- и мюонно неутрино ν_μ , тау-лептон τ^- и тау-неутрино ν_τ) и 6 кварка.

Фундаменталните взаимодействия се пренасят от частици, които се наричат фундаментални бозони. Преносител на електромагнитното взаимодействие е фотонът – това е квантът на електромагнитното поле. А на слабото взаимодействие – са тежките промеждутъчните бозони W^+ , W^- и Z^0 с маса почти 100 GeV – те са квантите на полетата на слабото взаимодействие. Слабите взаимодействия са универсални, защото фундаменталните бозони се излъчват и поглъщат не само от лептоните, но и от кварките. При енергии, много по-високи от енергията, съответстваща на масата на промеждутъчните бозони ($\sim 100 \text{ GeV}$), електромагнитното и слабото взаимодействие се обединяват в едно електрослабо взаимодействие. През 1960-1970 г. Глешоу, Уайнбърг и Салам създават теория за описанието на това обединено взаимодействие.

Преносители на силното взаимодействие са глюоните – това са квантите на осем глюонни полета. Глюоните си взаимодействат по

между си и с кварките. За обяснението се въвежда допълнително квантово число с три стойности. На тези числа съответстват заряди, наречени цветни. Самото квантово число се нарича цвят и приема три стойности: R (red – червен), G (green – зелен) и B (blue – син). Електричният заряд е източник на електромагнитното поле, а цветните заряди са източник на глюонните полета. С изучаването на силното взаимодействие на глюоните с кварките и между себе си се занимава квантовата хромодинамика.

След безспорно големия успех на теорията на електрослабото взаимодействие се създават теории, обединяващи трите взаимодействия – силното, електромагнитното и слабото. Те се наричат Великото обединение. Трите взаимодействия се обединяват при енергии, по-големи от $E \sim 10^{15} \text{ GeV}$, и се проявяват като едно универсално.

ВЪПРОСИ

1. На какво условие отговарят елементарните частици?
2. Какво е характерно за фундаменталните частици и кои са те?
3. Какво представляват античастиците?
4. Кои частици участват в слабите взаимодействия?
5. Кои частици участват в силните взаимодействия?
6. Кои частици са лептони?
7. Какво е позитрон? А мюон?
8. Какво представлява τ -лептонът?
9. Какви неутрина съществуват и как са свързани с лептони?
10. Какво са лептонно квантово число и лептонен заряд?
11. Кои частици са адрони?
12. От какви видове частици се състоят барионите?
13. Какво е барионен заряд?
14. Колко и какви аромати имат кварките?
15. Кои частици образуват класа на фундаменталните фермиони?
16. От колко кварки се състоят мезоните? А барионите?
17. Кой е преносител на електромагнитното взаимодействие?
18. Какво представляват променливите бозони W^+ , W^- и Z^0 ?
19. Кои са квантите на полетата на слабото взаимодействие?
20. Защо казваме, че слабите взаимодействия са универсални?
21. Кои са преносителите на силното взаимодействие?
22. Каква е разликата във взаимодействията на фотоните и глюоните?
23. Какво е цветен заряд?
24. С какво се занимава квантовата хромодинамика?

ЗАДАЧИ

Авторите си дават сметка, че стандартният модел и елементарните частици ще затруднят читателите. Затова в гл. 19 ÷ 20 задачите са с решения.

1. Електрон и позитрон са далеч един от друг и се движат един към друг с еднаква скорост. При удара си те анихилират в два фотона. Намерете енергията E , дължината на вълната λ и честотата ν на фотоните, ако кинетичните енергии на e^- и e^+ са: а) пренебрежимо малки, б) по 5,0 MeV. Енергията на покой за e^- е 0,511 MeV.

Решение: Началният импулс на системата е нула. За запазването на импулса двата фотона трябва да имат еднакви импулси p в противоположни направления. Тъй като за фотоните $E = pc = hc/\lambda = h\nu$, следва, че двата фотона трябва да имат еднакви E , λ и ν . Преди удара енергията на всяка от двете частици е $E_k + m_e c^2 = E_k + 0,511 \text{ MeV}$. Тук E_k е кинетичната енергия. Ако означим енергията на фотона с E , законът за запазване на енергията за удара е

$$(E_k + m_e c^2) + (E_k + m_e c^2) = E + E.$$

Оттук следва, че енергията на всеки фотон е $E = E_k + m_e c^2$.

а) Тъй като $E_k \approx 0$, то $E = m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$. Съответно за дължината на вълната и честотата на всеки фотон получаваме

$$\lambda = hc/E = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}, \quad \nu = E/h = 1,24 \cdot 10^{20} \text{ Hz}.$$

б) Понеже $E_k = 5,0 \text{ MeV}$, съответно за енергията, дължината на вълната и честотата на всеки фотон получаваме:

$$E = (5,0 + 0,511) \text{ MeV} = 5,511 \text{ MeV},$$

$$\lambda = 0,225 \cdot 10^{-12} \text{ m}, \quad \nu = 13,33 \cdot 10^{20} \text{ Hz}.$$

2. Защо свободният неутрон не се разпада на електрон и позитрон?

Решение: За решението са ни необходими знанията от § 19.4.

Разпадането не е възможно, защото се нарушават законите за запазване на барионния заряд.

3. Запазват ли се лептонните числа L_e и L_μ в реакцията

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Решение:

$$\begin{array}{l} \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \\ L_e \quad 0 \quad 1 \quad -1 \quad 0, \\ L_\mu \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad +1. \end{array}$$