

*Лекция 25. Элементарные частицы.*

*Основные характеристики. Типы взаимодействий. Классификация частиц. Лептоны и адроны. Кварковая структура адронов. Симметрия и законы сохранения в мире элементарных частиц.*

Элементарная частица - собирательный термин, относящийся к микрообъектам в субъядерном масштабе, которые невозможно расщепить на составные части. В современной физике термин «элементарные частицы» используют в более широком смысле: так называют мельчайшие частицы материи, подчиненные условию, что они не являются атомными ядрами и атомами (исключение составляет протон); иногда по этой причине элементарные частицы называют *субъядерными* частицами. Некоторые элементарные частицы (электрон, фотон, кварки и т. д.) на данный момент считаются бесструктурными и рассматриваются как первичные фундаментальные частицы. Другие элементарные частицы (так называемые составные частицы - протон, нейтрон и т.д.) имеют сложную внутреннюю структуру, но, тем не менее, по современным представлениям, разделить их на части невозможно. Строение и поведение элементарных частиц изучается физикой элементарных частиц.

Наиболее важное квантовое свойство всех элементарных частиц - их способность рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться) при взаимодействии с др. частицами. В этом отношении они полностью аналогичны фотонам. Элементарные частицы — это специфические кванты материи, более точно - кванты соответствующих физических полей. Все процессы с элементарными частицами протекают через последовательность актов их поглощения и испускания.

Распад нестабильных элементарных частиц на более лёгкие частицы, сопровождаемый выделением энергии, отвечает той же закономерности и является процессом, в котором продукты распада рождаются в момент самого распада и до этого момента не существуют. В этом отношении распад элементарных частиц подобен переходу возбуждённого атома в основное состояние с испусканием фотона.

На сегодня достоверно известно существование четырех фундаментальных взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, сильного, слабого. При этом электромагнитное и слабое взаимодействия являются проявлениями единого *электрослабого* взаимодействия.

Различные процессы с элементарными частицами заметно отличаются по интенсивности протекания. В соответствии с этим взаимодействия элементарных частиц можно феноменологически разделить на несколько классов: сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия. Все элементарные частицы обладают, кроме того, гравитационным взаимодействием.

*Сильные взаимодействия* выделяются как взаимодействия, которые порождают процессы, протекающие с наибольшей интенсивностью среди всех остальных процессов. Они приводят и к самой сильной связи элементарных частиц. Именно сильные взаимодействия обуславливают связь протонов и нейтронов в ядрах атомов и обеспечивают исключительную прочность этих образований, лежащую в основе стабильности вещества в земных условиях

*Электромагнитные взаимодействия* характеризуются как взаимодействия, в основе которых лежит связь с электромагнитным полем. Процессы, обусловленные ими, менее интенсивны, чем процессы сильных взаимодействий, а порождаемая ими связь элементарных частиц заметно слабее. Электромагнитные взаимодействия, в частности, ответственны за связь атомных электронов с ядрами и связь атомов в молекулах.

*Слабые взаимодействия*, как показывает само название, вызывают очень медленно протекающие процессы с элементарными частицами. Иллюстрацией их малой интенсивности может служить тот факт, что нейтрино, обладающие только слабыми взаимодействиями, беспрепятственно пронизывают, например, толщу Земли и Солнца. Слабые взаимодействия обуславливают также медленные распады так называемых квазистабильных элементарных частиц. Времена жизни этих частиц лежат в диапазоне  $10^{-8}$ - $10^{-10}$  сек, тогда как типичные времена для сильных взаимодействий элементарных частиц составляют  $10^{-23}$ - $10^{-24}$  сек.

*Гравитационные взаимодействия*, хорошо известные по своим макроскопическим проявлениям, в случае элементарных частиц на характерных расстояниях  $\sim 10^{-13}$  см дают чрезвычайно малые эффекты из-за малости масс элементарных частиц.

Ведутся поиски других типов фундаментальных взаимодействий, как в явлениях микромира, так и в космических масштабах, однако пока существование какого-либо другого типа фундаментального взаимодействия не обнаружено.

Классификация элементарных частиц.

По величине спина все элементарные частицы делятся на два класса: фермионы - частицы с полуцелым спином (например, электрон, протон, нейтрон, нейтрино); бозоны - частицы с целым спином (например, фотон, глюон, мезоны).

По видам взаимодействий элементарные частицы делятся на основные группы.

*Первую* составляют переносчики взаимодействий - *калибровочные бозоны* - частицы, посредством обмена которыми осуществляются взаимодействия. Сюда относится фотон, или квант электромагнитного излучения, - частица, переносящая электромагнитное взаимодействие. Переносчики электрослабого взаимодействия три промежуточных векторных бозона  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ , а также восемь глюонов - частиц, переносящих сильное взаимодействие. Сюда также следовало бы отнести *гравитон* - гипотетическую частицу, переносящую гравитационное взаимодействие. Однако существование гравитонов пока не доказано экспериментально.

*Вторая* группа элементарных частиц - лептоны (др.-греч.  $\lambda\epsilon\pi\tau\omicron\zeta$  - лёгкий), участвующие только в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Известно 6 лептонов: электрон, электронное нейтрино, мюон, мюонное нейтрино, тяжелый  $\tau$ -лептон (тау-лептон) и соответствующее  $\tau$ -нейтрино.

Электрон считается материальным носителем наименьшей массы в природе  $m_e$ , равной  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг (в энергетических единицах  $\approx 0,511$  МэВ) и наименьшего отрицательного электрического заряда  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Мюоны ( $\mu^-$ ) - частицы с массой около 207 масс электрона (105,7 МэВ) и отрицательным электрическим зарядом, равным заряду электрона; тяжелый  $\tau$ -лептон имеет массу около 1,8 ГэВ. Соответствующие этим частицам три типа нейтрино - электронное ( $\nu_e$ ), мюонное ( $\nu_\mu$ ) и  $\tau$ -нейтрино ( $\nu_\tau$ ) - легкие электрически нейтральные частицы. Все лептоны имеют спин  $\frac{1}{2}\hbar$ , т.е. являются *фермионами*.

Каждому из лептонов соответствует античастица, имеющая те же значения массы, спина и других характеристик, но отличающаяся знаком электрического заряда. Существуют позитрон ( $e^+$ ) - античастица по отношению к электрону, положительно заряженный мюон ( $\mu^+$ ) и три типа антинейтрино ( $\bar{\nu}_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\tau$ ), которым приписывают противоположный знак особого квантового числа, называемого *лептонным зарядом*.

*Третья группа* элементарных частиц - *адроны*, они участвуют в сильном, слабом и электромагнитном взаимодействиях. Адроны и лептоны образуют вещество.

Адроны представляют собой «тяжелые» частицы с массой, значительно превышающей массу электрона. Это наиболее многочисленная группа элементарных частиц. Адроны делятся на *барионы* - частицы со спином  $\frac{1}{2}\hbar$ , *мезоны* - частицы с целочисленным спином (0 или 1); а также так называемые *резонансы* - короткоживущие возбужденные состояния адронов.

К *барионам* (от греч.  $\beta\alpha\rho\rho\upsilon\varsigma$  - тяжёлый) относят протон и нейтрон. Из протонов и нейтронов построены все атомные ядра, именно сильное взаимодействие обуславливает связь этих частиц между собой. В сильном взаимодействии протон и нейтрон имеют одинаковые свойства и рассматриваются как два квантовых состояния одной частицы - нуклона с *изотопическим спином*  $\frac{1}{2}\hbar$ . Барионы включают и *гипероны* - элементарные частицы с массой больше нуклонной:  $\Lambda$ -гиперон имеет массу 1116 МэВ,  $\Sigma$ -гиперон - 1190 МэВ,  $\Theta$ -гиперон - 1320 МэВ,  $\Omega$ -гиперон - 1670 МэВ.

*Мезоны* (от др. греч.  $\mu\acute{\epsilon}\sigma\omicron\varsigma$  - средний) имеют массы, промежуточные между массами протона и электрона ( $\pi$ -мезон,  $K$ -мезон). Существуют мезоны нейтральные и заряженные (с положительным и отрицательным элементарным электрическим зарядом). Все мезоны по своим статистическим свойствам относятся к бозонам.

*Резонансы* (резонансные частицы) - короткоживущие возбуждённые состояния сильно взаимодействующих адронов. В отличие от др. нестабильных частиц, резонансы распадаются в основном за счёт сильных взаимодействий. Поэтому их времена жизни лежат в интервале  $10^{-22} \div 10^{-24}$  сек, что по порядку величины совпадает с характерным ядерным временем.

Кроме того, в так называемой *Стандартной модели* с необходимостью присутствует *хиггсовский бозон*, который, впрочем, пока ещё не обнаружен экспериментально.

### Основные свойства элементарных частиц

Каждая элементарная частица описывается набором дискретных значений физических величин (квантовых чисел). Общие характеристики всех элементарных частиц - масса, время жизни, спин, электрический заряд.

В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на стабильные, квази-стабильные и нестабильные (резонансы).

*Стабильными* (в пределах точности современных измерений) являются: электрон (время жизни более  $5 \cdot 10^{21}$  лет), протон (более  $10^{31}$  лет), фотон и нейтрино.

К *квазистабильным* относятся частицы, распадающиеся вследствие электромагнитного и слабого взаимодействий, их времена жизни более  $10^{-20}$  с.

*Резонансы* распадаются за счёт сильного взаимодействия, их характерные времена жизни имеют порядок характерного ядерного времени  $10^{-22} - 10^{-24}$  с. В некоторых случаях распад тяжёлых резонансов (с массой  $> 3$  Гэв) за счёт сильных взаимодействий оказывается подавленным и время жизни увеличивается до значений  $\sim 10^{-20}$  сек

*Внутренними* характеристиками (квантовыми числами) элементарных частиц являются лептонный (символ  $L$ ) и барионный (символ  $B$ ) заряды; эти числа считаются строго *сохраняющимися величинами* для всех типов фундаментальных взаимодействий.

Лептоны несут специфический *лептонный заряд*  $L = +1$ , для лептонных нейтрино и их античастиц  $L$  имеют противоположные знаки  $L = -1$ .

Кроме того, в физике элементарных частиц для лептонов (и кварков) вводится понятие «поколение» как часть классификации элементарных частиц. В каждом поколении два лептона (и два кварка). Два лептона - это один лептон с электрическим зарядом  $-1$  (подобный электрону) и один нейтральный (нейтрино).

Существует три поколения лептонов:

- первое поколение: электрон, электронное нейтрино;
- второе поколение: мюон, мюонное нейтрино;
- третье поколение: тау-лептон, тау-нейтрино.

Каждый член следующего поколения имеет массу большую, чем соответствующая частица предыдущего. Все обычные атомы содержат частицы первого поколения. Второе и третье поколения заряженных частиц не присутствуют в обычной материи и наблюдаются только в условиях очень высоких энергий. Нейтрино всех поколений пронизывают вселенную, но редко взаимодействуют с обычной материей.

Для адронов  $L = 0$ , и это ещё одно проявление их отличия от лептонов. В свою очередь, значительные части адронов следует приписать особый *барионный заряд*  $B$ .

Адроны с  $B = +1$  образуют подгруппу *барионов*, для соответствующих античастиц  $B = -1$ . Адроны с  $B = 0$  образуют подгруппу мезонов.

Для лептонов  $B = 0$ . Для фотона  $B = 0$  и  $L = 0$ .

Для адронов характерно наличие особых квантовых чисел: «странности», «очарования», «красоты». Обычные (нестранные) адроны - протон, нейтрон,  $\pi$ -мезоны. Барионы и мезоны подразделяются на совокупности: обычных (нестранных) частиц (протон, нейтрон,  $\pi$ -мезоны), странных частиц (гипероны,  $K$ -мезоны) и очарованных частиц. Этому разделению отвечает наличие у адронов особых квантовых чисел: странности  $S$  и очарования (английское charm)  $Ch$  с допустимыми значениями:  $S = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$  и  $Ch = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ . Для обычных частиц  $S = 0$  и  $Ch$

$= 0$ , для странных частиц  $S \neq 0$ ,  $Ch = 0$ , для очарованных частиц  $Ch \neq 0$ . Вместо странности часто используется квантовое число *гиперзаряд*  $Y = S + B$ .

Уже первые исследования с обычными адронами выявили наличие среди них семейств частиц, близких по массе, с очень сходными свойствами по отношению к сильным взаимодействиям, но с различными значениями электрического заряда. Протон и нейтрон (нуклоны) были первым примером такого семейства. Позднее аналогичные семейства были обнаружены среди странных и среди очарованных адронов. Общность свойств частиц, входящих в такие семейства, является отражением существования у них одинакового значения специального квантового числа - *изотопического спина*  $I$ , принимающего, как и обычный спин, целые и полуцелые значения. Сами семейства обычно называются *изотопическими мультиплетами*. Число частиц в мультиплете  $N$  связано с  $I$  соотношением:  $N = 2I + 1$ . Частицы одного изотопического мультиплета отличаются друг от друга значением «проекции» изотопического спина  $I_z$ . С точки зрения теории изоспина, нейтрон и протон являются одной и той же частицей – нуклоном с *изоспином*  $I=1/2$  – в двух разных состояниях, различающихся *проекцией вектора изоспина* на выделенную ось  $I_z$  в *пространстве изоспина*. Таких проекций для момента  $I=1/2$  может быть только две:  $I_z=+1/2$  (протон) и  $I_z = -1/2$  (нейтрон).

Важной характеристикой адронов является также *внутренняя чётность*  $P$ , связанная с операцией пространственной инверсии (заменой пространственных направлений на обратные). Величина  $P$  принимает значения  $\pm 1$ .

Для всех элементарных частиц с ненулевыми значениями хотя бы одного из зарядов  $Q, L, B, Y, S$  и очарования  $Ch$  существуют античастицы с теми же значениями массы  $m$ , времени жизни  $t$ , спина  $J$  и для адронов изотопического спина  $I$ , но с противоположными знаками всех зарядов и для барионов с противоположным знаком внутренней чётности  $P$ .

Частицы, не имеющие античастиц, называются абсолютно (истинно) нейтральными. Абсолютно нейтральные адроны обладают специальным квантовым числом - зарядовой чётностью (т. е. чётностью по отношению к операции *зарядового сопряжения*)  $C$  со значениями  $\pm 1$ ; примерами таких частиц могут служить фотон и  $\pi^0$ .

Важное свойство элементарных частиц – их способность к взаимопревращениям в результате электромагнитных или других взаимодействий. Один из видов взаимопревращений – так называемое *рождение пары*, или образование одновременно частицы и античастицы (в общем случае - образование пары элементарных частиц с противоположными лептонными или барионными зарядами). Возможны процессы рождения электрон-позитронных пар  $e^-e^+$ , мюонных пар  $\mu^+\mu^-$  новых тяжелых частиц при столкновениях лептонов, образование из кварков  $cc$ - и  $bb$ -состояний. Другой вид взаимопревращений элементарных частиц - аннигиляция пары при столкновениях частиц с образованием конечного числа фотонов ( $\gamma$ -квантов). Обычно образуются 2 фотона при нулевом суммарном спине сталкивающихся частиц и 3 фотона - при суммарном спине, равном 1 (проявление закона сохранения зарядовой четности).

При определенных условиях, в частности при невысокой скорости сталкивающихся частиц, возможно образование связанной системы - позитрония  $e^-e^+$  и мюония  $\mu^+e^-$ . Эти нестабильные системы, часто называемые водородоподобными атомами. Их время жизни в веществе в большой степени зависит от свойств вещества, что позволяет использовать водородоподобные атомы для изучения структуры конденсированного вещества и кинетики быстрых химических реакций.

### Кварковая модель адронов

Детальное рассмотрение квантовых чисел адронов с целью их классификации позволило сделать вывод о существовании особых структурных единиц, из которых построены адроны, – *кварков*.

Гипотеза о том, что адроны построены из специфических субъединиц, была впервые выдвинута М.Гелл-Манном и, независимо от него, Дж. Цвейгом в 1964 году. Слово «кварк» было заимствовано Гелл-Манном из романа Дж. Джойса «Поминки по Финнегану», где в одном из

эпизодов звучит фраза «Three quarks for Muster Mark!» (обычно переводится как «Три кварка для Мастера Марка!»).

В настоящее время известно 6 типов кварков. Спин всех кварков  $\frac{1}{2}$  (фермионы). Барионный заряд  $\frac{1}{3}$ . Кварки естественным образом группируются в три поколения. В каждом поколении один кварк обладает электрическим зарядом  $+\frac{2}{3}$ , а другой  $-\frac{1}{3}$ .

Символ	Название		Электрический заряд (в долях $e$ )	Масса
	русское	английское		
Первое поколение				
$d$	нижний	<i>down</i>	$-\frac{1}{3}$	$\sim 5 \text{ МэВ}/c^2$
$u$	верхний	<i>up</i>	$+\frac{2}{3}$	$\sim 3 \text{ МэВ}/c^2$
Второе поколение				
$s$	странный	<i>strange</i>	$-\frac{1}{3}$	$95 \pm 25 \text{ МэВ}/c^2$
$c$	очарованный	<i>charm (charmed)</i>	$+\frac{2}{3}$	$1,8 \text{ ГэВ}/c^2$
Третье поколение				
$b$	прелестный	<i>beauty (bottom)</i>	$-\frac{1}{3}$	$4,5 \text{ ГэВ}/c^2$
$t$	истинный	<i>truth (top)</i>	$+\frac{2}{3}$	$171 \text{ ГэВ}/c^2$

Каждому кварку приписываются определённые квантовые числа, называемые *ароматами*. Так кварк  $s$  имеет ненулевое квантовое число странности  $S=1$ , кварк  $c$  - ненулевое число шарма  $Ch=1$ , кварк  $b$  - квантовое число прелести (красоты)  $b=1$ , кварк  $t$  - квантовое число истинности (правды)  $T=1$ . Кваркам  $d$  и  $u$  приписывается аромат - проекция *изоспина*. Для  $d$  эта проекция равна  $I_z=-\frac{1}{2}$ , а для  $u$   $I_z=+\frac{1}{2}$  соответственно.

Каждому кварку соответствует *антикварк* с противоположными квантовыми числами.

Кроме того постулируется, что кварки обладают и дополнительной внутренней характеристикой, задаваемой квантовым числом «цвет». Цвет кварка может принимать три значения: жёлтый, красный и синий (голубой), смесь которых является бесцветной.

Согласно постулату бесцветности все наблюдаемые в природе адроны бесцветны (кварки в адронах образуют бесцветные комбинации). Соответственно, антикварками приписывается антицвет. Сильное взаимодействие вызывает притяжение либо двух частиц с противоположным цветом (цвет и антицвет), либо трех частиц с определенной комбинацией цветов, которая в сумме дает «белый» цвет. Из-за такой аналогии с восприятием цвета и был выбран такой термин для данного квантового числа.

Цветовое взаимодействие между кварками осуществляется посредством обмена *глюонами*.

Глюон (англ. glue - клей) - безмассовая элементарная частица со спином, равным 1, являющаяся переносчиком сильного (цветового) взаимодействия между кварками, которое склеивает их в адроны. Всего существует восемь видов (цветовых комбинаций) глюонов. Глюоны являются квантами векторного поля в квантовой хромодинамике.

Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях. Сильные взаимодействия (обмен глюоном) могут изменять цвет кварка, но не меняют его аромат. Слабые взаимодействия, наоборот, не меняют цвет, но могут менять аромат, т.е. все ароматы квантовых чисел сохраняются при сильном и электромагнитном взаимодействиях, но не сохраняются при слабом взаимодействии.

Каждый барион состоит из трёх кварков, поскольку только в этом случае суммарный барионный заряд равен единице  $B=1$ .

Пример. Протон состоит из двух  $u$ -кварков и одного  $d$ -кварка  $p = uud (\uparrow\downarrow\uparrow)$ . Стрелками показаны ориентации спинов. Нейтрон состоит из одного  $u$ -кварка и двух  $d$ -кварков  $n = udd (\uparrow\downarrow\uparrow)$ .

У мезонов барионный заряд  $B=0$ , поэтому они состоят из пар кварк и антикварк.

Пример. Положительный пи-мезон состоит из  $u$ -кварка и  $d$ -антикварка  $\pi^+ = u\bar{d} (\uparrow\downarrow)$ .

Отрицательный пи-мезон состоит из  $u$ -антикварка и  $d$ -кварка  $\pi^- = \bar{u}d (\uparrow\downarrow)$ .

Нейтральный пи-мезон является суперпозицией состояний  $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$ .

Силы, действующие между кварками, не ослабевают с расстоянием, т.е. для отделения кварков друг от друга требуется бесконечно большая энергия. Необычные свойства сильного взаимодействия приводят к тому, что одиночный кварк не может удалиться на какое-либо заметное расстояние от других кварков, а значит, кварки и антикварки не могут наблюдаться в свободном виде (явление, получившее название *конфайнмент*). Разлететься могут лишь «бесцветные» комбинации кварков - адроны.

Законы сохранения в мире элементарных частиц

Квантовые числа разделяются на точные (т. е. такие, которые связаны с физическими величинами, сохраняющимися во всех процессах) и неточные (для которых соответствующие физические величины в части процессов не сохраняются).

При всех типах взаимодействия выполняются следующие законы сохранения (точные)

Закон сохранения энергии.

Закон сохранения импульса.

Закон сохранения момента количества движения.

Закон сохранения электрического заряда.

Закон сохранения лептонного заряда.

Закон сохранения барионного заряда.

Установлено, что каждый закон сохранения связан с какой-либо симметрией в окружающем нас мире. Так законы сохранения энергии и импульса связаны с однородностью времени и пространства. Закон сохранения момента количества движения связан с симметрией пространства относительно вращений. Законы сохранения зарядов связаны с симметрией физических законов относительно специальных преобразований, описывающих частицы.

Изоспин  $I$  - определяет число частиц, входящих в один *изотопический мультиплет*.

Зарядовая четность,  $C$  (зарядовое сопряжение). Операция зарядового сопряжения переводит частицы в античастицы, т.е. меняет знаки зарядов, оставляя неизменными пространственные переменные, импульс и момент импульса.

Временная четность,  $T$  соответствует инверсии времени (направление течения времени меняется на обратное).

Комбинированная четность  $CP$  — комбинированная инверсия  $CP$  является последовательной комбинацией  $C$  и  $P$  преобразований.

$CPT$ -четность - последовательная комбинация  $C$ ,  $P$  и  $T$  преобразований.

$G$ -четность - это квантовое число, соответствующее симметрии относительно одновременной операции зарядового сопряжения и изменения знака третьей компоненты  $I_z$  изоспина.

Спин связан со строгим законом сохранения момента количества движения и потому является точным квантовым числом. Другие точные квантовые числа:  $Q$ ,  $L$ ,  $B$ ; по современным данным, они сохраняются при всех превращениях. Стабильность протона есть непосредственное выражение сохранения  $B$ . Однако, большинство квантовых чисел адронов неточные. Изотопический спин, сохраняясь в сильных взаимодействиях, не сохраняется в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Странность и очарование сохраняются в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняются в слабых взаимодействиях. Слабые взаимодействия изменяют также внутреннюю и зарядовую четности. С гораздо большей степенью точности сохраняется комбинированная четность  $CP$ , однако и она нарушается в некоторых процессах, обусловленных слабыми взаимодействиями. Сохранение или несохранение тех или иных квантовых чисел - одно из существенных проявлений различий классов взаимодействий элементарных частиц.

$CPT$ -инвариантность - это фундаментальная симметрия физических законов при преобразованиях, включающих одновременную инверсию заряда, четности и времени. Подтекст  $CPT$ -симметрии состоит в том, что зеркальное отображение нашей Вселенной - импульсы и положения всех объектов отражены в мнимой плоскости (что соответствует инверсии четности  $P$ ), вся материя заменена на антиматерию (что соответствует инверсии заряда  $C$ ), и обращена во вре-

мени (Т) - будет вести себя так же, как и наша вселенная. В любой момент соответствующих времён две вселенные будут идентичны, и преобразование СРТ запросто превратит одну в другую. СРТ-симметрия считается фундаментальным качеством физических законов.

Характеристика	Взаимодействие		
	Сильное	Электромагнитное	Слабое
Электрический заряд, Q	+	+	+
Энергия, E	+	+	+
Импульс, p	+	+	+
Угловой момент, J	+	+	+
Барионный заряд, B	+	+	+
Лептонный заряд L.	+	+	+
Странность, S	+	+	-
Очарование, Ch	+	+	-
Красота, b	+	+	-
Истина, t	+	+	-
Изоспин, I	+	-	-
Проекция изоспина, I <sub>z</sub>	+	+	-
Пространственная четность, P	+	+	-
Зарядовая четность, C	+	+	-
Временная четность, T	+	+	-
Комбинированная четность, CP	+	+	-
СРТ-четность	+	+	+
G-четность	+	-	-

### Создание единой теории фундаментальных взаимодействий

Первой из теорий взаимодействий стала теория электромагнетизма, созданная Максвеллом в 1863 году. Затем в 1915 г. Эйнштейн сформулировал общую теорию относительности, описывающую гравитационное поле. Появилась идея построения единой теории фундаментальных взаимодействий (которых на тот момент было известно только два), подобно тому как Максвеллу удалось создать общее описание электрических и магнитных явлений. Такая единая теория объединила бы гравитацию и электромагнетизм в качестве частных проявлений некоего единого взаимодействия.

В течение первой половины XX века ряд физиков предприняли многочисленные попытки создания такой теории, однако ни одной полностью удовлетворительной модели выдвинуто не было. Это, в частности, связано с тем, что общая теория относительности и теория электромагнетизма различны по своей сути. Тяготение описывается искривлением пространства-времени, и в этом смысле гравитационное поле нематериально, в то время как электромагнитное поле является *материей*.

Во второй половине XX столетия задача построения единой теории осложнилась необходимостью внесения в неё слабого и сильного взаимодействий, а также квантования теории.

В 1967 году Саламом и Вайнбергом была создана теория электрослабого взаимодействия, объединившая электромагнетизм и слабые взаимодействия. Позднее в 1973 году была предложена теория сильного взаимодействия (квантовая хромодинамика). На их основе была построена *Стандартная Модель* элементарных частиц, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия.

Экспериментальная проверка Стандартной Модели заключается в обнаружении предсказанных ею частиц и их свойств. В настоящий момент открыты все элементарные частицы Стандартной Модели, за исключением хиггсовского бозона.

*Бозон Хиггса*, или Хиггсовский бозон - теоретически предсказанная элементарная частица, квант поля Хиггса, с необходимостью возникающая в Стандартной Модели вследствие

хиггсовского механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии. Хиггсовский бозон обладает нулевым спином. Существование бозона предсказано Питером Хиггсом в 1960 году. В рамках Стандартной Модели бозон Хиггса отвечает за массу элементарных частиц.

Бозон Хиггса - последняя до сих пор не найденная частица Стандартной модели. Частица Хиггса так важна, что нобелевский лауреат Леон Ледерман назвал её «частицей-богом». Однако, в средствах массовой информации бозон Хиггса «обозвали» как «частица Бога».

Стандартная модель в значительной степени рассматривается скорее как теория временная, а не действительно фундаментальная, поскольку она не включает в себя гравитацию и содержит несколько десятков свободных параметров (массы частиц и т. д.), значения которых не вытекают непосредственно из теории. Возможно, существуют элементарные частицы, которые не описываются Стандартной моделью - например, такие, как гравитон (частица, переносящая гравитационные силы) или суперсимметричные партнёры обычных частиц.

Таким образом, в настоящее время фундаментальные взаимодействия описываются двумя общепринятыми теориями: общей теорией относительности и Стандартной Моделью. Их объединения пока достичь не удалось из-за трудностей создания квантовой теории гравитации. Для дальнейшего объединения фундаментальных взаимодействий используются различные подходы: *теории струн*, *петлевая квантовая гравитация*, а также *M-теория*.

#### Античастицы

Античастицы - элементарные частицы, имеющие те же значения масс, спинов и др. физ. характеристик, что и их «двойники» - «частицы», но отличающиеся от них знаками некоторых характеристик взаимодействия (например знаком электрического заряда).

Существование античастиц было предсказано П. А. М. Дираком. Полученное им в 1928 квантовое релятивистское уравнение движения электрона с необходимостью содержало решения с отрицательными энергиями. В дальнейшем было показано, что исчезновение электрона с отрицательной энергией следует интерпретировать как возникновение частицы (той же массы) с положительной энергией и с положительным электрическим зарядом, т. е. античастицей по отношению к электрону. Эта частица - *позитрон* - открыта в 1932.

В последующих экспериментах было установлено, что не только электрон, но и все остальные частицы имеют свои античастицы. К настоящему времени античастицы наблюдались практически для всех известных частиц. Между частицей и её античастицей возможна аннигиляция.

*Аннигиляция* пары частица-античастица (от латинского *annihilatio* - уничтожение, исчезновение) - один из видов взаимопревращения элементарных частиц. Термином аннигиляция первоначально был назван электромагнитный процесс превращения электрона и его *античастицы* - позитрона при их столкновении в электромагнитное излучение (в фотоны). Однако этот термин неудачен, т. к. в процессах аннигиляции материя не уничтожается, а лишь превращается из одной формы в другую.

Существование и свойства античастиц определяются в соответствии с фундаментальным принципом квантовой теории поля - её инвариантностью относительно *CPT*-преобразования. Из *CPT*-теоремы следует, что масса, спин и время жизни частицы и её античастица должны быть одинаковыми. В частности, стабильным (относительно распада) частицам соответствуют стабильные античастицы (однако в веществе сколько-нибудь длительное существование их невозможно из-за *аннигиляции* с частицами вещества). Состояния частиц и их античастиц связаны операцией *зарядового сопряжения*.

Поэтому частица и её античастица имеют противоположные знаки электрических зарядов (и магнитных моментов), имеют одинаковый *изотопический спин*, но отличаются знаком его третьей проекции, имеют одинаковые по величине, но противоположные по знаку *странность*, *очарование*, *красоту* и т. д. Преобразование *комбинированной инверсии (CP)* связывает спиральные состояния частицы с состояниями античастиц противоположной спиральности. Частицам и их античастицам приписываются одинаковые по величине, но противоположные по знаку барионное и лептонное числа.

Вследствие инвариантности относительно зарядового сопряжения ( $C$ -инвариантности) сильного и электромагнитного взаимодействий связанные соответствующими силами составные объекты из частиц (атомные ядра, атомы) и из античастиц (ядра и атомы *антивещества*) должны иметь идентичную структуру. По той же причине совпадает структура адронов и их античастиц, причём в рамках модели *кварков* состояния антибарионов описываются точно так же, как состояния барионов с заменой составляющих кварков на соответствующие им *антикварки*. Состояния мезонов и их античастиц отличаются заменой составляющих кварка и антикварка на соответствующие антикварк и кварк. Для *истинно нейтральных частиц* состояния частицы и античастицы совпадают. Такие частицы обладают определёнными *зарядовой чётностью* ( $C$ -чётностью) и  $CP$ -чётностью. Все известные истинно нейтральные частицы - бозоны (напр.,  $\pi^0$ -мезон - со спином фотон - со спином 1), однако в принципе могут существовать и истинно нейтральные фермионы (так называемые *майорановские частицы*).

Само определение того, что называть «частицей» в паре частица- античастица, в значительной мере условно. Однако при данном выборе «частицы» её античастица определяется однозначно. Сохранение барионного числа в процессах слабого взаимодействия позволяет по цепочке распадов барионов определить «частицу» в любой паре барион-антибарион. Выбор электрона как «частицы» в паре электрон-позитрон фиксирует (вследствие сохранения лептонного числа в процессах слабого взаимодействия) определение состояния «частицы» в паре электронных нейтрино-антинейтрино.

Рождение античастиц происходит в столкновениях частиц вещества, разогнанных до энергий, превосходящих порог рождения пары частица- античастица. В лабораторных условиях античастицы рождаются во взаимодействиях частиц на ускорителях; хранение образующихся античастиц осуществляют в *накопительных кольцах* при высоком вакууме. В естественных условиях античастицы рождаются при взаимодействии первичных космических лучей с веществом, например, атмосферы Земли, а также должны рождаться в окрестностях *пульсаров* и активных ядер галактик. Теоретическая астрофизика рассматривает образование античастиц (позитронов, антинуклонов) при аккреции вещества на *чёрные дыры*. В рамках современной космологии рассматривают рождение античастиц при испарении первичных чёрных дыр малой массы.

При энергиях, превышающих энергию покоя частиц данного, пары частица- античастица присутствуют в равновесии с веществом и электромагнитным излучением. Такие условия могут реализовываться для электрон-позитронных пар в горячих ядрах массивных звёзд. Согласно теории горячей Вселенной, на очень ранних стадиях расширения Вселенной в равновесии с веществом и излучением находились пары частица- античастица всех сортов. В соответствии с моделями *великого объединения* эффекты нарушения  $C$ -и  $CP$ -инвариантности в неравновесных процессах с несохранением барионного числа могли привести в очень ранней Вселенной к *барионной асимметрии Вселенной* даже в условиях строгого начального равенства числа частиц и античастиц. Это даёт физическое обоснование отсутствию наблюдательных данных о существовании во Вселенной объектов из античастиц.

#### Вакуум

Под физическим вакуумом в современной физике понимают полностью лишённое вещества пространство. Даже если бы удалось получить это состояние на практике, оно не было бы абсолютной пустотой. Квантовая теория поля утверждает, что, в согласии с принципом неопределённости, в физическом вакууме постоянно рождаются и исчезают виртуальные частицы: происходят так называемые нулевые колебания полей. В том числе, возможно даже рождение заряженных частиц в паре со своей античастицей. Эта пара может существовать очень короткое время, в пределах квантовой неопределённости  $\Delta t \sim \frac{\hbar}{\Delta E}$ , чтобы не нарушать закон сохранения энергии. Но если на вакуум воздействует внешнее поле, то за счёт его энергии возможно рождение реальных частиц. Взаимодействие частиц с вакуумом приводит к изменению массы и заряда частиц.

*Поляризация вакуума* в квантовой электродинамике заключается в образовании виртуальных электронно-позитронных (а также мюон-антимюонных и таон-антитаонных) пар из вакуума под влиянием электромагнитного поля. Поляризация вакуума приводит к радиационным поправкам к законам квантовой электродинамики и к взаимодействию нейтральных частиц с электромагнитным полем. Так, лэмбовский сдвиг атомных уровней объясняется нулевыми колебаниями электромагнитного поля в физическом вакууме.

### Стандартная модель

Стандартная модель - теоретическая конструкция в физике элементарных частиц, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие всех элементарных частиц. Стандартная модель *не включает* в себя гравитацию.

Стандартная модель состоит из следующих положений:

Всё вещество состоит из 12 фундаментальных частиц-фермионов: 6 лептонов (электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино) и 6 кварков ( $u, d, s, c, b, t$ ), которые можно объединить в три поколения фермионов.

Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряженные лептоны (электрон, мюон, тау-лептон) - в слабых и электромагнитных; нейтрино - только в слабых взаимодействиях.

Все три типа взаимодействий возникают как следствие постулата, что наш мир симметричен относительно трёх типов калибровочных преобразований.

Частицами-переносчиками взаимодействий являются:

8 глюонов для сильного взаимодействия (группа симметрии  $SU(3)$ );

3 тяжёлых калибровочных бозона ( $W^+, W^-, Z^0$ ) для слабого взаимодействия (группа симметрии  $SU(2)$ );

один фотон для электромагнитного взаимодействия (группа симметрии  $U(1)$ ).

В отличие от электромагнитного и сильного, слабое взаимодействие может смешивать фермионы из разных поколений, что приводит к нестабильности всех частиц, за исключением легчайших, и к таким эффектам, как нарушение  $CP$  – инвариантности и нейтринные осцилляции.

До сих пор все предсказания Стандартной модели подтверждались экспериментально, иногда с очень высокой точностью в миллионные доли процента. Только в последние годы стали появляться результаты, в которых предсказания Стандартной модели *слегка* расходятся с экспериментом и даже явления, крайне трудно поддающиеся интерпретации в её рамках.

С другой стороны, очевидно, что Стандартная модель не может являться последним словом в физике элементарных частиц, ибо она содержит слишком много внешних параметров, а также не включает гравитацию. Поэтому поиск отклонений от Стандартной модели (так называемой «новой физики») одно из самых активных направлений исследования в последние годы. Ожидается, что эксперименты на Большом Адронном коллайдере (ЛHC) смогут зарегистрировать множество отклонений от Стандартной модели.