

## Глава 2. Фундаментальные частицы

### 2.1 Фермионы и бозоны

Все частицы делятся на два больших класса: фермионы и бозоны. Фермионы названы в честь великого итальянского физика 20 века – Энрико Ферми, а бозоны – в честь индийского физика Бозе. Позднее Вы узнаете, что фермионы подчиняются статистике Ферми-Дирака, а бозоны – статистике Бозе-Эйнштейна. Есть однозначное простое правило, как узнать является ли фундаментальная частица фермионом или бозоном. У каждой частицы есть внутренний, собственный механический момент, модуль которого равен

$$S = \sqrt{s(s+1)} \hbar, \quad (1)$$

где  $\hbar$  – модифицированная постоянная Планка ( $\hbar = h/2\pi = 1,055 \cdot 10^{-34}$  Дж·с),  $s$  – спиновое квантовое число, которое часто называют для краткости спином. Спин  $s$  может принимать только целые или полуцелые значения

$$s = \begin{cases} 1/2, 3/2, 5/2, 7/2, 9/2, 11/2, \dots & \text{фермионы} \\ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots & \text{бозоны} \end{cases}$$

Если спин целый, то частица – бозон. Например, спин фотона равен 1. Если спин полуцелый, то частица – фермион. У любого кварка или лептона спин равен 1/2. У каждой из известных Вам частиц электрона, протона, нейтрона  $s = 1/2$ . При этом электрон – лептон – фундаментальная частица, а протон и нейтрон состоят из кварков. Таким образом, и для составной частицы спин определяет, является она фермионом или бозоном. Теорему о связи спина частицы со статистикой Ферми-Дирака или Бозе-Эйнштейна доказал великий английский физик Поль Дирак – один из создателей квантовой теории.

Фермионы и бозоны играют разную роль в строении материи. Фермионы называют кирпичами мироздания. Из них строятся более сложные объекты подобно тому, как из кирпичей строятся блоки зданий и сооружений. Но чтобы кирпичный дом не развалился, необходимо кирпичи соединить между собой цементом или клеем.

Необходимы силы притяжения между фермионами, чтобы состоящие из них сложные объекты, были прочными, устойчивыми и не разваливались от легких внешних воздействий.

Бозоны являются частицами квантованных полей, переносчиками взаимодействий. Они обеспечивают силы притяжения, а также силы отталкивания между фермионами.

### 2.2 Фундаментальные фермионы – кварки и лептоны трех поколений.

По отношению к физическим объектам слово «фундаментальный» означает бесструктурный, самый простой. Не состоит из других частиц, а, напротив, все другие состоят из фундаментальных.

Вторая половина прошедшего 20 века ознаменовалась выдающимися открытиями в области фундаментальных частиц. Теоретически и экспериментально были открыты кварки и новые виды лептонов. В таблице 1 собраны все фундаментальные фермионы, известные науке сегодня. Каждая из этих частиц имеет спин  $s = \frac{1}{2}$ .

Таблица 1

Фермионы		Поколение			Электрический заряд, $ e $
		1	2	3	
Кварки	верхний	u	c	t	+2/3
	нижний	d	s	b	-1/3
Лептоны	верхний	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0
	нижний	e	$\mu$	$\tau$	-1

### Происхождение названий кварков

Название кварка	Происхождение названия
u-кварк	up – вверх
d-кварк	down – вниз
c-кварк	charm – шарм
s-кварк	strange – странный
t-кварк	top– верх или truth – истина
b-кварк	bottom – низ или beauty – красота

### Названия лептонов

e – электрон,  $\mu$  – мюон,  $\tau$  – таон,

$\nu_e$  – нейтрино электронное,  $\nu_\mu$  – нейтрино мюонное,  $\nu_\tau$  – нейтрино таонное.

Чем старше поколение частиц, тем больше их массы и тем меньше времена жизни. Массы кварков растут в следующей последовательности: u, d, s, c, b, t. Самый устойчивый u-кварк. Самый короткоживущий – t-кварк. Массы нижних лептонов растут в следующей последовательности e,  $\mu$ ,  $\tau$ . Время жизни электрона бесконечно, мюона  $2 \cdot 10^{-6}$  с, таона  $10^{-13}$  с.

### 2.3 Античастицы

**ТЕОРЕМА: КАЖДОЙ ЧАСТИЦЕ СООТВЕТСТВУЕТ АНТИЧАСТИЦА.** Эту теорему доказал великий английский физик Поль Дирак. Все заряды частицы и античастицы одинаковы по величине и противоположны по знаку. Остальные характеристики совпадают, например, масса, спин и др. История открытия античастиц такова. В 1928 г. Дирак соединил квантовое уравнение Шредингера с теорией относительности Эйнштейна и получил квантовое релятивистское (от relative – относительный) уравнение для электрона, которое называют уравнением Дирака. Из этого уравнения последовал ряд новых выводов. **Первый:** электрон имеет собственный,

внутренний механический момент – «спин», который характеризуется спиновым квантовым числом  $s = 1/2$ . **Второй:** кроме известного отрицательно заряженного электрона, существует положительно заряженный – позитрон (от positive - положительный), который имеет такую же массу и спин. В 1932 г. Андерсен обнаружил позитрон экспериментально, наблюдая воздействие космических лучей высоких энергий на камеру Вильсона, помещенную в постоянное магнитное поле. Камера Вильсона позволяет проявить трек (след) частицы. В однородном магнитном поле заряженная частица под действием силы Лоренца движется по окружности, радиус которой зависит от ее удельного заряда ( $q/m$ ). Андерсен обнаружил два трека: один принадлежал электрону, а второй частице такой же массы, но противоположного по знаку заряда – позитрону (рис. 1).

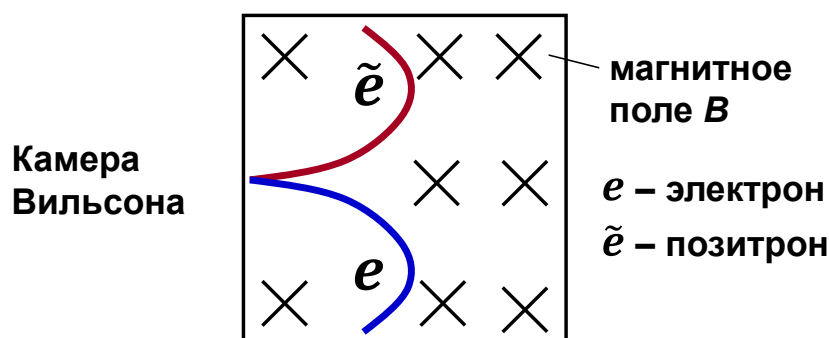


Рис. 1 Треки электрона  $e$  и позитрона  $\tilde{e}$  в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле

Сегодня открыты многие античастицы: антипротон ( $\tilde{p}$ ), антинейтрон ( $\tilde{n}$ ) и даже антиядра, например, антигелий  ${}^4_2\tilde{\text{He}}$ . Название античастицы строится из названия частицы добавлением приставки «анти». Единственное исключение – позитрон. Символ античастицы отмечают обычно волнистым знаком «тильдой». Все фундаментальные фермионы и антифермионы – кварки и лептоны, антикварки и антилептоны удобно представить на шкале электрического заряда.

Таблица 2

Q,  e	Фермионы			Антифермионы		
	поколение			поколение		
	1	2	3	1	2	3
+1				$\tilde{e}$	$\tilde{\mu}$	$\tilde{\tau}$
+2/3	u	c	t			
+1/3				$\tilde{d}$	$\tilde{s}$	$\tilde{b}$
0	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$\tilde{\nu}_e$	$\tilde{\nu}_\mu$	$\tilde{\nu}_\tau$
-1/3	d	s	b			
-2/3				$\tilde{u}$	$\tilde{c}$	$\tilde{t}$
-1	e	$\mu$	$\tau$			

## 2.4 Универсальный механизм взаимодействия частиц в природе

В процессе эволюции природы сформировался один универсальный механизм (способ) взаимодействия между частицами. Если провести аналогию с развитием человеческого общества, то можно сказать, что этот механизм взаимодействия выиграл конкуренцию у всех остальных, стал монополистом. Это не единичное явление. Можно привести другие примеры подобного монополизма. В живой природе от простейших одноклеточных до человека действует единственный механизм передачи наследственной информации. Сущность универсального механизма взаимодействия частиц в природе проста: **фермионы обмениваются бозонами, и обмен обеспечивает как притяжение, так и отталкивание**. Следует отметить, что обмен происходит, как правило, **виртуально**. Смысл этого мы рассмотрим позднее. На рис. 2 схематично показано, как обмен бозонами, летящим подобно бумерангам, обеспечивает притяжение двух фермионов, а на рис. 3 показано, как обеспечивается отталкивание фермионов.

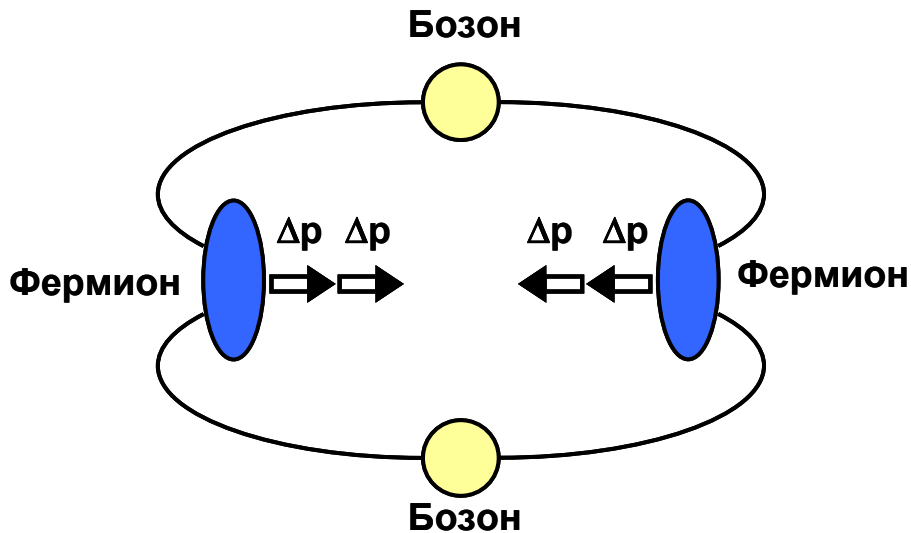


Рис. 2 Обмен бозонами как бумерангами обеспечивает притяжение фермионов

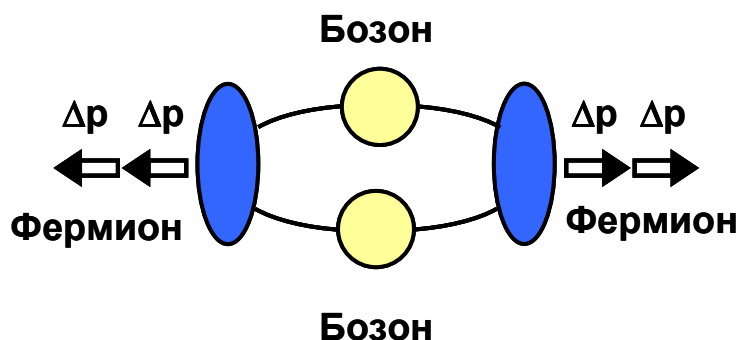


Рис. 3 Обмен бозонами, летящими по кратчайшему пути, обеспечивает отталкивание фермионов

Фермион испускает бозон и получает импульс отдачи  $\Delta p$ , равный по величине и противоположный по направлению импульсу испущенного бозона. Второй фермион поглощает бозон и получает импульс  $(-\Delta p)$ . Затем стартует второй фермион, испускает бозон, а первый

фермион его поглощает. Начальное состояние восстанавливается. Но результат обмена не равен нулю. Результатом является **притяжение фермионов**, если обмен происходит так, как показано на рис. 2, и **отталкивание фермионов**, если обмен происходит, как показано на рис. 3. Можно оценить силы, действующие на фермионы. Пусть на рождение, полет в одну сторону и поглощение бозона затрачивается время  $\Delta t$ . Тогда продолжительность одного цикла (период) обмена  $2\Delta t$ . За это время первый фермион изменяет импульс на  $2\Delta p$ , а второй на  $(-2\Delta p)$ . Наилучшее определение силы дал Ньютон вторым законом классической механики:

$$F = \frac{dp}{dt}. \quad (2)$$

Сила, действующая на первый фермион со стороны второго

$$F_{12} = \frac{2\Delta p}{2\Delta t} = \frac{\Delta p}{\Delta t}, \quad (3)$$

а на второй со стороны первого

$$F_{21} = -\frac{2\Delta p}{2\Delta t} = -\frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (4)$$

В рассматриваемом случае

$$F_{12} = -F_{21}, \quad (5)$$

выполняется третий закон Ньютона. Может возникнуть вопрос: как получается, что механизм взаимодействия частиц один для всей природы, а конкретные взаимодействия (силы) сильно отличаются своими характеристиками?

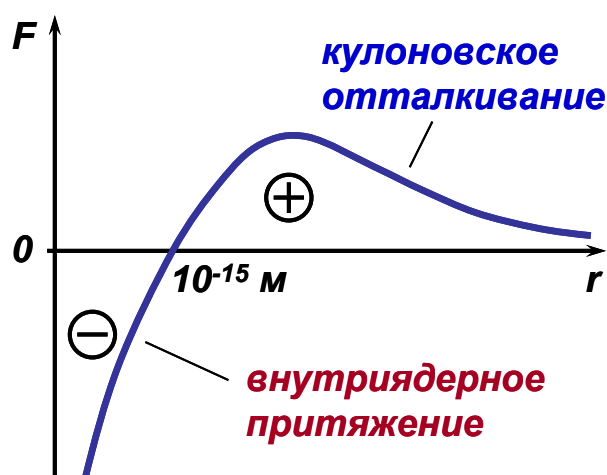


Рис. 4 Сила взаимодействия двух протонов или двух легких ядер как функция расстояния между ними

Например, два протона в ядре сильно притягиваются, обмениваясь  $\pi$ -мезонами. И это притяжение на малых расстояниях порядка  $10^{-15}$  м намного (почти в  $10^3$  раз) сильнее их электромагнитного (кулоновского) отталкивания путем обмена фотонами. Но внутриядерное притяжение является

короткодействующим, а кулоновское отталкивание далекодействующим. Так что на малых расстояниях порядка  $10^{-15}$  м два протона притягиваются, а на больших – отталкиваются.

Характеристики взаимодействия определяются видом обменных бозонов и частотой обмена. Действительно,  $\Delta p = m_B v$ , где  $m_B$  – масса бозона,  $v$  – его скорость. Чем массивнее бозон и чем больше частота обмена, тем больше сила взаимодействия. Позднее Вы узнаете, что, чем массивнее бозон, тем меньше его время жизни, отпущенное природой. Обмен массивными бозонами обеспечивает сильное, но короткодействующее взаимодействие.

## 2.5 Фундаментальные бозоны и четыре вида фундаментальных полей – переносчиков взаимодействия

В настоящее время известны четыре вида фундаментальных взаимодействий: адронное (цветовое), электромагнитное, слабое и гравитационное (см. таблицу 3). Переносчиками этих взаимодействий являются соответствующие поля, квантами которых являются фундаментальные бозоны.

Таблица 3

№ п/п	Взаимодействие, поле	Фундаментальные бозоны		Относительная интенсивность	Характерное время, с
		название	обозначение		
1	Адронное	глюоны	g	1	$10^{-23}$
2	Электромагнитное	фотон	$\gamma$	$10^{-2}$	$10^{-19}$
3	Слабое	Промежуточные векторные бозоны	$W^+, Z^0, W^-$	$10^{-6}$	$10^{-11}$
4	Гравитационное	гравитон (???)	G	$10^{-39}$	-

Глюоны, фотоны и промежуточные векторные бозоны называются **калибровочными бозонами**, так как их можно описать с помощью единого подхода (калибровки) в рамках наиболее общей на данный момент Стандартной модели (физики элементарных частиц). Кроме того существует **скалярный бозон Хиггса**, который является ответственным за наличие массы у векторных бозонов, лептонов и кварков. Вопрос существования гравитона, как бозона-переносчика гравитационного взаимодействия на данный момент остается открытым ввиду отсутствия надежных экспериментальных данных и удовлетворительной теории квантовой гравитации.

**Объединение взаимодействий.** Современная теория утверждает, что разделение взаимодействий на адронное, электромагнитное, слабое и гравитационное является относительным, справедливым для нашей остывшей Вселенной. С ростом температуры или энергии частиц они приобретают способность сближаться до очень малых расстояний и при этом происходит объединение взаимодействий. И наоборот при понижении температуры и энергии частиц единые взаимодействия разделяются на составные. Предполагается, что в момент Большого взрыва и рождения Вселенной температура достигала  $10^{32}$  К, энергия частиц была

порядка  $10^{19}$  ГэВ =  $10^{28}$  эВ. Тогда все четыре взаимодействия были объединены в одно. В физике это явление называют Сверхвеликим объединением. По мере расширения после Взрыва Вселенная остывала и при энергии частиц порядка  $10^{24}$  эВ из единого взаимодействия выделилось гравитационное. Осталось единое адронное, электромагнитное и слабое взаимодействие. Это явление названо Великим объединением. При дальнейшем остывании Вселенной произошел очередной фазовый переход, и выделилось адронное взаимодействие. Осталось единое электрослабое взаимодействие, объединяющее электромагнитное и слабое. Теорию электрослабого взаимодействия создали выдающиеся физики: Вайнберг, Глэшоу и Салам. Они предсказали существование промежуточных векторных бозонов:  $W^+$ ,  $Z^0$ ,  $W^-$  – переносчиков слабого взаимодействия. И затем эти частицы – «родственники фотона» – были открыты экспериментально. Когда энергия частиц становится меньше  $10^9$  эВ, электрослабое взаимодействие разделяется на электромагнитное и слабое. Четыре фундаментальных взаимодействия становятся отдельными.

Первое объединение взаимодействий строго осуществил еще в 19 веке Джеймс Клерк МАКСВЕЛЛ. Он построил теорию единого электромагнитного поля и показал, что электрическое и магнитное поля являются частными проявлениями электромагнитного. Альберт Эйнштейн стремился объединить электромагнитное и гравитационное взаимодействие. Это ему не удалось. Но идея объединения взаимодействий прочно утвердилась в физике и принесла первые значительные результаты.