

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»

Кафедра общей физики

А. С. Кобякин

**ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

Учебно-методическое пособие

МОСКВА
МФТИ
2018

УДК 539.12(075)
ББК 22.382я73
К55

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент *Л. В. Инжечик*

Кобякин, А. С.

К55 Введение в физику элементарных частиц: учебно-методическое пособие. — А. С. Кобякин. — М.: МФТИ, 2018. — 19 с.

Кратко приведена базовая классификация элементарных частиц, описаны переносчики основных фундаментальных взаимодействий и их свойства, а также приведены основы техники построения диаграмм Фейнмана для описания механизмов реакций с участием элементарных частиц.

Предназначено для студентов 3-го курса МФТИ(ГУ), а также может рассматриваться как введение к дальнейшему изучению предмета.

УДК 539.12(075)
ББК 22.382я73

© Кобякин А.С., 2018
© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», 2018

Содержание

Вводные замечания	4
1. Условная классификация элементарных частиц	4
1.1. Фундаментальные взаимодействия и их переносчики	5
1.2. Лептоны	7
1.3. Адроны и кварки	8
2. Диаграммы Фейнмана	10
3. Слабое взаимодействие	13
4. Законы сохранения	16
Литература	18

Вводные замечания

Во второй половине XX века физика элементарных частиц бурно развивалась, и к настоящему моменту она представляет собой достаточно сложную, запутанную и сильно математизированную теорию, разобраться в которой с ходу проблематично. В данном пособии излагаются базовые основы строения материи с точки зрения Стандартной модели физики элементарных частиц, которая сложилась в середине 80-х годов XX века и получила окончательное подтверждение с открытием бозона Хиггса в 2012 году. При этом за прошедшее время теоретики придумали множество всевозможных расширений модели, начиная от суперсимметрии и заканчивая теорией струн, но на данный момент ни одно из них не получило экспериментального подтверждения. Все новые экспериментальные факты, обнаруженные с момента создания Стандартной модели, например, наличие нейтринных осцилляций и ненулевой массы у нейтрино, вполне успешно в неё вписались и не привели к кардинальному пересмотру модели.

Кроме того, даже основы теории представляют собой туго закрученный конгломерат взаимосвязанных утверждений и понятий, изложить которые в виде линейного рассказа представляется достаточно проблематичным. Поэтому в данном пособии могут встретиться ссылки вперёд, а также иногда придётся возвращаться к уже изложенному материалу и добавлять к нему новые сведения.

1. Условная классификация элементарных частиц

Все частицы, которые относятся к элементарным, делятся на несколько групп:

- переносчики взаимодействий (к которым можно отнести и недавно открытый бозон Хиггса),
- лептоны,
- кварки.

Адроны (к ним, например, относятся протон и нейтрон) — это частицы, которые состоят из кварков, поэтому их не относят к действительно элементарным (называемым ещё также фундаментальными) частицам, но историческое название «элементарные» для них сохранилось и часто используется.

Про каждую из этих групп в дальнейшем будет подробно рассказано в соответствующем разделе. Пока же хотелось бы отметить, что

у всех лептонов и кварков, а также у многих адронов есть партнёр-античастица, которая обозначается той же буквой, но с чертой сверху. Она имеет ту же массу, что и исходная частица, но все её заряды (электрический, барионный, лептонный...) меняют знак на противоположный.

1.1. Фундаментальные взаимодействия и их переносчики

Всего в природе насчитывается четыре фундаментальных взаимодействия: сильное, слабое, гравитационное и электромагнитное. В последнее время к ним иногда добавляют взаимодействие с полем Хиггса, за счёт которого большинство частиц приобретает массу.

Примерная оценка относительной силы различных фундаментальных взаимодействий для двух протонов, находящихся на характерном внутриядерном расстоянии, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Примерная относительная сила фундаментальных взаимодействий, приведенная для двух протонов на характерном внутриядерном расстоянии

Вид взаимодействия	Относительная сила
Сильное	1
Электромагнитное	10^{-2}
Слабое	10^{-13}
Гравитационное	10^{-37}

По современным представлениям, все фундаментальные взаимодействия происходят локально, поэтому у каждого из них есть одна или несколько частиц-переносчиков этого взаимодействия. Взаимодействие между другими частицами осуществляется за счёт обмена этими переносчиками, при этом все известные на данный момент переносчики являются бозонами — частицами с целым спином.

С переносчиком электромагнитного взаимодействия вы уже знакомы — это фотон, который взаимодействует только с частицами, имеющими электрический заряд. К процессам с участием фотона относятся фотоэффект, эффект Комптона, аннигиляция электрон-позитронной пары и другие.

Переносчиком гравитационного взаимодействия является гравитон — гипотетическая частица со спином, равным 2. Роль заряда для гравитационного взаимодействия играет масса. Сам гравитон, как и фо-

тон, является безмассовым, поэтому электромагнитное и гравитационное взаимодействия не ограничены по расстоянию. К сожалению, из-за крайней малости величины взаимодействия на характерных для физики микромира расстояниях гравитон и соответствующие ему реакции экспериментально никто не видел, поэтому при дальнейшем рассмотрении материала этот вид взаимодействия нигде не будет учитываться.

Слабое взаимодействие происходит за счёт обмена W^{+-} , W^- или Z -бозонами. Первые два из них при этом обладают ещё и электрическим зарядом, третий — нейтрален. При этом, в отличие от предыдущих частиц, эти переносчики являются массивными частицами с характерными массами 80.4 ГэВ для W -бозонов и 91.2 ГэВ для Z -бозона (см. [1]). Именно поэтому слабое взаимодействие очень быстро убывает с расстоянием. В слабом взаимодействии принимают участие все частицы, с которыми способны взаимодействовать приведённые промежуточные бозоны, подробно данное взаимодействие будет описано в одной из следующих глав.

Для сильного взаимодействия переносчиком является глюон. При этом аналогом электрического заряда является заряд сильного взаимодействия, который является ещё одним квантовым числом и называется «цветом». Всего цветов бывает три, при этом кварки, из которых состоят участвующие в сильном взаимодействии частицы, обладают цветом, а антикварки — антицветом; три различных цвета (антицвета) одновременно дают нейтральную бесцветную «окраску». Сами глюоны при этом тоже являются окрашенными и переносят пару «цвет—антицвет». Из трёх цветов и трёх антицветов получается 9 возможных комбинаций, одна из которых (с учётом суперпозиции состояний) оказывается бесцветной, так что всего остаётся восемь глюонов-переносчиков. Также для сильного взаимодействия характерно антиэкранирование. Поскольку глюоны сами несут цветовой заряд и способны взаимодействовать друг с другом, то с удалением от точки рождения они могут порождать новые глюоны, эффективно усиливая взаимодействие. Таким образом, с ростом расстояния сильное взаимодействие не убывает, как остальные, а наоборот, растёт, что и называется антиэкранированием. Это приводит к тому, что из потенциально участвующих в сильном взаимодействии частиц удаляться на большие расстояния друг от друга и быть свободными могут только бесцветные частицы.

Взаимодействие с полем Хиггса получило экспериментальное подтверждение сравнительно недавно, в 2012 году, когда был экспериментально обнаружен давно предсказанный бозон Хиггса. Особенность этого поля в том, что для бозонов Хиггса физический вакуум имеет

минимальную энергию не тогда, когда в нём ничего нет (как обстоит дело с другими частицами), а при наличии в нём определённой концентрации «выпавших в осадок» бозонов Хигса. Это приводит к тому, что остальные частицы в процессе движения вынуждены постоянно взаимодействовать с этими бозонами, приобретая при этом массу.

1.2. Лептоны

К лептонам относятся частицы, не участвующие в сильном взаимодействии. Все лептоны не имеют внутренней структуры (точнее, на данный момент её признаков не удалось обнаружить), т.е. являются действительно элементарными частицами. Всего имеется шесть лептонов (и шесть соответствующих им антилептонов), собранных в три группы, называемых поколениями, они приведены в табл. 2.

Таблица 2

Лептоны (частица/античастица)

I поколение	II поколение	III поколение
Электрон/позитрон e^-/e^+	Мюон μ^-/μ^+	Таон τ^-/τ^+
Нейтрино/антинейтрино		
Электронное $\nu_e/\bar{\nu}_e$	Мюонное $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$	Тау $\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$

Среди лептонов особую роль играют нейтрино. Сравнительно недавно выяснилось, что нейтрино разных типов могут в процессе перемещения в пространстве с некоторой вероятностью переходить одно в другое, например, нейтрино, испущенное как электронное, может с некоторой вероятностью оказаться мюонным или тау-нейтрино в точке регистрации. При этом вероятность смены состояний зависит как от пройденного расстояния, так и от энергии нейтрино. Этот эффект называется осцилляциями нейтрино, и за его открытие руководителям экспериментов SNO (см. статью [2]) и Super-Kamiokande (см. статью [3]) была присуждена Нобелевская премия по физике за 2015 год. Кроме того, вероятность осцилляций зависит также и от квадрата разности масс различных типов нейтрино, таким образом, их обнаружение означает, что как минимум два вида нейтрино имеют хоть и очень маленькую (менее 1 эВ), но ненулевую массу.

1.3. Адроны и кварки

К адронам относятся частицы, способные принимать участие в сильном взаимодействии. Все они не являются истинно элементарными, а состоят из кварков, антикварков или их комбинаций. Каждый кварк обладает цветовым зарядом, а, как уже говорилось в разделе про взаимодействия, сильное взаимодействие усиливается с расстоянием. Именно это обстоятельство приводит к невозможности существования кварков в свободном состоянии, это явление называется конфайнментом. В свободном состоянии могут существовать бесцветные частицы, подобную окраску, например, могут дать три кварка (или три антикварка), несущие три разных цвета (антицвета), частицы с таким строением называются барионы (антибарионы). Другим вариантом получить бесцветную комбинацию является пара кварк-антикварк (несущие цвет и антицвет), и частицы с таким строением называются мезонами. Теоретически также возможны комбинации из двух кварк-антикварковых пар (тетракварки) или четырёх кварков и одного антикварка (пентакварки). За последние несколько лет эксперименты LHCb, BES III, D0 с высоким уровнем достоверности экспериментально обнаружили несколько частиц-кандидатов на роль тетра- и пентакварков.

Таблица 3

Кварки

I поколение	II поколение	III поколение	Электрический заряд
u up верхний	c charm(charmed) очарованный	t top(truth) истинный	$+\frac{2}{3}e$
d down нижний	s strange странный	b bottom(beauty) преlestный	$-\frac{1}{3}e$

Как и в случае лептонов, в природе существует шесть различных кварков и шесть антикварков, сгруппированных в три поколения. Тип кварка называется его ароматом, или флейвором. Обозначения кварков, а также их названия (русские и международные) приведены в табл. 3. Там же приведены их электрические заряды в единицах заряда электрона, все кварки из верхней строчки таблицы обладают зарядом $+\frac{2}{3}e$, из нижней — $-\frac{1}{3}e$. Из этой же таблицы заметна некоторая

путаница с названиями кварков третьего поколения. Дело в том, что исторически они были названы *truth* и *beauty*, но в последнее время практически все специалисты перешли на *top* и *bottom*. В русском языке сделать перевод современных названий *t*- и *b*-кварков отличным от *u*- и *d*-кварков оказалось достаточно проблематично, поэтому сохранились старые названия.

Некоторой проблемой оказалось приписать кваркам определённую массу. Дело в том, что, по определению, масса кварка — это то, что стоит в уравнениях, описывающих его взаимодействие с другими частицами (иногда можно встретить название «токовая масса»). Оказалось, что она принципиально отличается от результата, который можно получить, пытаясь вывести массы кварков как набор слагаемых, дающих в сумме массу обычных частиц с учётом их кваркового состава (так называемая «блоковая» или «конституэнтная» масса). Кроме того, токовая масса зависит от характерной энергии процесса (именно поэтому в литературе можно, например, встретить значение массы *d*-кварка в виде диапазона значений 1.7–3.3 МэВ [1]). Тем не менее стоит заметить, что массы кварков, как и лептонов, растут с увеличением номера поколения. Самым тяжёлым кварком оказался *t*-кварк, его масса составляет около 172 ГэВ (см. [1]) и настолько велика, что он распадается за счёт слабого взаимодействия быстрее, чем успевает сформировать какую-нибудь частицу вместе с другими кварками.

Кварки могут переходить из одного в другой только в результате слабого взаимодействия. Во всех процессах, протекающих за счёт сильного или электромагнитного взаимодействия, кварки сохраняют свои ароматы и могут только перераспределяться между частицами.

В настоящее время насчитывается более тысячи различных адронов, обнаруженных экспериментально. Есть определённые исторически сложившиеся правила наименований различных адронов, благодаря которым по названию можно определить кварковый состав частицы. Для изложения основной идеи этих правил назовём лёгкими *u*- и *d*-кварки. При этом буква, обозначающая частицу, определяется тем кварком (или кварками) в составе, который не является лёгким, а лёгкие кварки определяются по знаку заряда частицы, написанному вверху справа. Если впоследствии открывали частицу, в которой один из кварков был заменён на более тяжёлый, то вместо присвоения новой буквы к обозначению старой частицы внизу в качестве индекса дописывался символ нового кварка (или символы, если было несколько замен). При этом большая часть названий частиц была сформирована ещё до открытия кварковой структуры и несёт в себе множество исторических артефактов (так, например, мезоны с *s*-кварком в составе

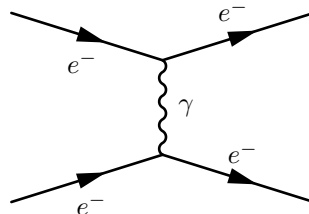
были отнесены к античастицам, а \bar{s} -кварком — к частицам), поэтому описывать эту систему целиком особого смысла не имеет.

Примеры кваркового состава некоторых адронов приведены в табл. 4. Обратите внимание, что некоторые частицы представляют собой суперпозицию нескольких кварковых состояний, например, π^0 -мезон или η -мезон. Кроме того, есть частицы, у которых кварковый состав одинаков, например, протон p и изобара $\Delta^+(1232)$. Они отличаются состояниями входящих в их состав кварков, в приведённом примере $\Delta^+(1232)$ является возбуждённым состоянием протона. В подобном случае в скобках указывается масса данного возбуждённого состояния в МэВ.

2. Диаграммы Фейнмана

Внутренние детали процессов взаимодействия обычно изображаются с помощью диаграммной техники — диаграмм Фейнмана, для которых по специальным правилам можно сразу записать формулу для расчёта сечения изображённой реакции. На диаграмме каждая частица изображается определённой линией, при этом свободные концы линий слева сопоставляются частицам, вступающим в реакцию, а справа — получающимся в результате. Течение времени в ходе процесса соответствует движению по диаграмме слева направо. Вершины соответствуют элементарным взаимодействиям в ходе реакции, а внутренние линии — промежуточным частицам. При этом для каждой вершины должны выполняться все законы сохранения для соответствующих параметров (например, для электрического заряда, импульса, момента импульса и т.д.) входящих и выходящих из неё частиц.

Пример диаграммы процесса упругого электромагнитного рассеяния электрона на электроне $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$ приведён ниже:



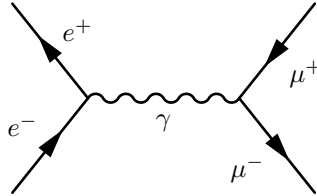
Обратите внимание, что на диаграмме электроны обозначены прямой линией (так обозначаются все фермионы — частицы с полуцелым спином), а фотон — волнистой линией (так обозначаются бозоны —

Таблица 4

Примеры адронов (данные взяты из [1])

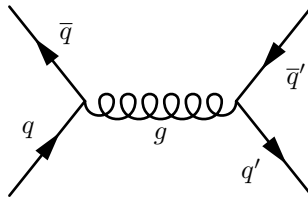
Частица	Обозначение	Кварковый состав
Барионы		
Протон	p	uud
Нейтрон	n	udd
Дельта-плюс-изобара 1232	$\Delta^+(1232)$	uud
Дельта-плюс-изобара 1600	$\Delta^+(1600)$	uud
Дельта-ноль-изобара 1232	$\Delta^0(1232)$	udd
Дельта-плюс-плюс-изобара 1232	$\Delta^{++}(1232)$	uuu
Анти-сигма-минус-гиперон	$\bar{\Sigma}^-$	$\bar{u}\bar{u}\bar{s}$
Кси-ноль-гиперон	Ξ^0	uss
Омега-минус-гиперон	Ω^-	sss
Очарованный омега-гиперон	Ω_c^0	ssc
Очарованный кси-плюс-гиперон	Ξ_c^+	usc
Прелестный кси-ноль-гиперон	Ξ_b^0	usb
Мезоны		
Пи-минус-мезон	π^-	$\bar{u}d$
Пи-плюс-мезон	π^+	$u\bar{d}$
Пи-ноль-мезон	π^0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$
Эта-мезон	η	$\frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$
Омега-мезон 782	$\omega(782)$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$
К-ноль-мезон	K^0	$d\bar{s}$
Анти-к-ноль-мезон	\bar{K}^0	$\bar{d}s$
К-плюс-мезон	K^+	$u\bar{s}$
Джи-пси-мезон	J/ψ	$c\bar{c}$
Ипсилон-мезон	Υ	$b\bar{b}$
Д-плюс-мезон	D^+	$c\bar{d}$
Странный д-плюс-мезон	D_s^+	$c\bar{s}$
Б-ноль-мезон	B^0	$d\bar{b}$
Очарованный б-минус-мезон	B_c^-	$\bar{c}b$

частицы с целым спином). При этом стрелки на линиях, соответствующих обычным частицам, обычно направлены вдоль хода течения времени, а античастицам — против хода течения времени. Так, например, диаграмма процесса превращения электрон-позитронной пары в пару мюонов $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ изображается следующим образом:

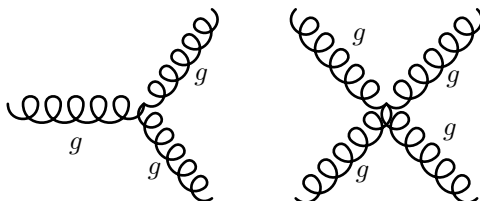


При этом видно, что для позитрона e^+ и положительно заряженного мюона μ^+ стрелки направлены против хода времени на диаграмме, поскольку они являются античастицами для электрона e^- и отрицательно заряженного мюона μ^- . При этом на обеих диаграммах вершины с участием фотона включают в себя две прямых и одну волнистую линии. Сам фотон электрически нейтрален, поэтому сам с собой напрямую не взаимодействует и для него другие виды вершин невозможны.

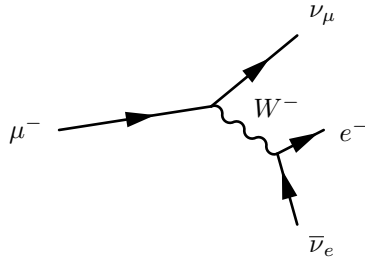
Совсем по-другому выглядит картина для глюонов. Пример перехода пары кварк-антикварк в другую пару за счёт сильного взаимодействия $q + \bar{q} \rightarrow q' + \bar{q}'$ показан на диаграмме:



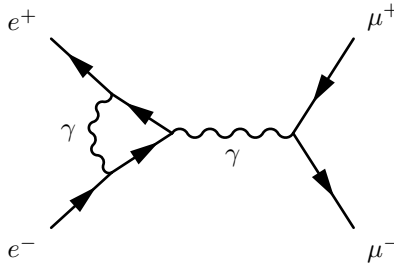
Поскольку глюоны окрашены, то возможно их взаимодействие друг с другом напрямую, так что возможны трёх- и даже четырёхглюонные вершины, как, например, изображённые ниже:



В качестве примера диаграммы с участием слабого взаимодействия приведён распад мюона $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$:



Уравнение реакции задаёт только входящие в диаграмму и выходящие из неё частицы. Все внутренние детали могут быть любыми, пока они не противоречат физическим ограничениям на протекающие процессы. Это приводит к тому, что ко всем диаграммам можно добавить поправки, связанные с участием в процессе других промежуточных частиц. Например, для нарисованной выше диаграммы реакции $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ можно добавить поправку, связанную с рождением промежуточного фотона:



При этом каждая такая поправка увеличивает количество вершин внутри диаграммы. Каждой вершине в формуле для расчёта сечения реакции соответствует определённая константа взаимодействия, в случае электромагнитного взаимодействия эта константа называется постоянной тонкой структуры $\alpha \approx \frac{1}{137}$. Таким образом, каждая добавленная фотонная вершина уменьшает сечение реакции примерно в α раз, что приводит к малости эффекта от введённых электромагнитных поправок и возможности рассчитывать сечения реакций в рамках теории возмущений.

3. Слабое взаимодействие

Слабое взаимодействие выделяется на фоне остальных тем, что это единственное взаимодействие, способное превращать одни кварки в другие или одни лептоны в другие. Процессы, происходящие за

счёт слабого взаимодействия, протекают с испусканием и поглощением W^{+-} , W^- или Z -бозонов. Для того чтобы определить, какие превращения возможны, рассмотрим возможные варианты распадов соответствующих бозонов-переносчиков. Обратите внимание, что они распадаются всегда на истинно элементарные частицы, не имеющие внутренней структуры. Также все приведённые реакции могут протекать и в обратном направлении.

Z -бозон нейтрален, поэтому суммарный электрический заряд его продуктов распада равен нулю. Он всегда распадается на пару «частица/её античастица», этой частицей может быть любой лептон или кварк:

$$\begin{aligned} Z &\rightarrow e^+ + e^-, Z \rightarrow \mu^+ + \mu^-, Z \rightarrow \tau^+ + \tau^- \\ Z &\rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e, Z \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu, Z \rightarrow \nu_\tau + \bar{\nu}_\tau \\ Z &\rightarrow u + \bar{u}, Z \rightarrow c + \bar{c}, Z \rightarrow t + \bar{t} \\ Z &\rightarrow d + \bar{d}, Z \rightarrow s + \bar{s}, Z \rightarrow b + \bar{b} \end{aligned}$$

W -бозон заряжен, суммарный заряд продуктов его распада равен заряду самого W -бозона, при этом варианты для W^+ и W^- отличаются только заменой всех частиц на соответствующие античастицы. W -бозон распадается на пару лептон-антилептон или кварк-антикварк, причём лептон и антилептон должны быть обязательно из одного поколения. Приведём каналы распада для W^+ -бозона (напомним, что для каналов распада W^- -бозона надо в списке заменить все частицы на их античастицы):

$$\begin{aligned} W^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e, W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, W^+ \rightarrow \tau^+ + \nu_\tau \\ W^+ &\rightarrow \bar{d} + u, W^+ \rightarrow \bar{d} + c, W^+ \rightarrow \bar{d} + t \\ W^+ &\rightarrow \bar{s} + u, W^+ \rightarrow \bar{s} + c, W^+ \rightarrow \bar{s} + t \\ W^+ &\rightarrow \bar{b} + u, W^+ \rightarrow \bar{b} + c, W^+ \rightarrow \bar{b} + t \end{aligned}$$

Для того чтобы получить из канала распада промежуточного бозона соответствующий ему возможный вариант превращения частицы при поглощении этого бозона, надо в уравнении реакции перенести любую частицу из левой части в правую с заменой её на античастицу. Так, например, из распада $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ получается $e^- + W^+ \rightarrow \nu_e$ или $\bar{\nu}_e + W^+ \rightarrow e^+$, а из распада $Z \rightarrow e^+ + e^-$ получается $e^- + Z \rightarrow e^-$ или $e^+ + Z \rightarrow e^+$. Для уравнения реакции с испусканием бозона достаточно в уравнении реакции с поглощением поменять местами левую и правую части.

Таким образом, видно, что при испускании или поглощении Z -бозона исходная частица не меняется, а W -бозон переводит лептон или кварк из одной строчки таблицы 2 или 3 в другую. При этом для лептонов переход осуществляется в пределах одного поколения, а для кварков возможны все варианты, показанные на рис. 1.

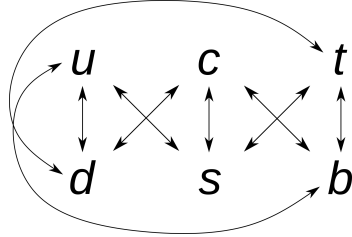
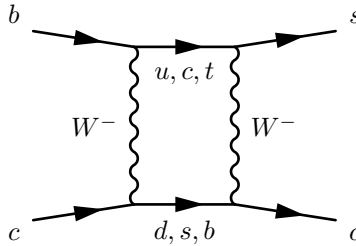
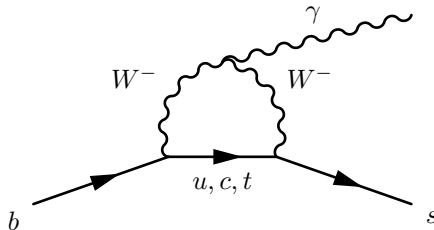


Рис. 1. Переходы между кварками с испусканием или поглощением W -бозона

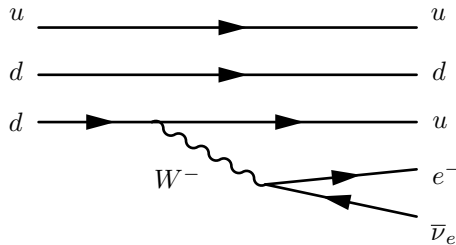
Обратите внимание, что ни для лептонов, ни для кварков переходы в пределах одной строчки таблицы невозможны. Тем не менее существуют механизмы, позволяющие осуществить подобные переходы в несколько этапов. Таким, например, является GIM-механизм (механизм Глэшоу—Илиопулоса—Майяни [4]):



Другим вариантом являются «нейтральные токи, меняющие аромат» (flavour-changing neutral currents, FCNCs), пример которых показан на приведённой диаграмме (такие диаграммы, в которых есть петля с испусканием частицы, называются пингвинными):



Одним из примеров реакции, протекающей за счёт слабого взаимодействия, является распад мюона, который был приведён в разделе про диаграммы Фейнмана. Другим примером является бета-распад нейтрона $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, изображённый на следующей диаграмме:



На этой диаграмме видно, что d-кварк в составе нейтрона переходит в u-кварк в составе протона с испусканием W^- -бозона, который распадается на электрон и электронное антинейтрино, оставшиеся два кварка в реакции не участвуют.

4. Законы сохранения

В физике элементарных частиц работают все законы сохранения, которые работают на больших масштабах: энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда. Исторически к ним были добавлены несколько специфических эмпирических законов сохранения, которые впоследствии получили объяснение после открытия кварков и промежуточных бозонов. К таким, например, относится закон сохранения барионного заряда (разности количества барионов и антибарионов в обеих частях уравнения реакции), который просто является следствием того, что кварки и антикварки рождаются и исчезают парами. К ним же относится закон сохранения лептонного заряда (разности количества лептонов и антилептонов в обеих частях уравнения реакции), объясняющийся возможными превращениями с участием W^- и Z -бозонов. Для сильного и электромагнитного взаимодействий были введены законы сохранения странности, прелести, очарования и истинности, которые по сути являются утверждениями о том, что разность количества кварков и антикварков для странных, очарованных, прелестных или истинных кварков не меняется в процессе сильного или электромагнитного взаимодействия; к этой же категории относится и закон сохранения изоспина (определяющегося количеством u- и d-кварков). В настоящее время все эти факты получили объяснение в рамках Стандартной модели на основе кварковой теории и не требуют введения отдельных дополнительных законов сохранения.

Все перечисленные законы сохранения являются аддитивными, то есть в ходе реакции сохраняется сумма определённых параметров участвующих частиц (энергий, импульсов...). Помимо этого, есть некоторые мультипликативные законы сохранения, когда сохраняющиеся величины представляют собой произведение параметров участвующих частиц. К таким, например, относится закон сохранения пространственной чётности, который работает для электромагнитных и сильных взаимодействий.

Литература

1. *Nakamura K. et al.* Review of Particle Physics // Journal of Physics G. 2010. V. 37. N 7A. 075021
2. *Ahmad Q.R. et al.* Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ Interactions Produced by 8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. P. 071301
3. *Fukuda Y. et al.* Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 1562
4. *Glashow S.L., Iliopoulos J., Maiani L.* Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry // Phys. Rev. D. 1970. V. 2. P. 1285

Учебное издание

Кобякин Александр Сергеевич

**ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *О. П. Котова*. Корректор *И. А. Волкова*.
Компьютерная верстка *А. С. Кобякин, Е. А. Казённова*.

Подписано в печать 15.10.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 298.

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495) 408-5822. E-mail: rio@mail.ru

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495) 408-84-30. E-mail: polygraph@mail.ru