**Мир элементарных частиц**

В середине и второй половине ХХ века в тех разделах физики, которые заняты изучением фундаментальной структуры материи, были получены поистине удивительные результаты. Прежде всего это проявилось в открытии целого множества новых субатомных частиц. Их обычно называют элементарными частицами, но далеко не все из них действительно элементарны. Многие из них в свою очередь состоят из еще более элементарных частичек.

Мир субатомных частиц поистине многообразен. К ним относятся протоны и нейтроны, составляющие атомные ядра, а также обращающиеся вокруг ядер электроны. Но есть и такие частицы, которые в окружающем нас веществе практически не встречаются. Время их жизни чрезвычайно мало, оно составляет мельчайшие доли секунды. По истечении этого чрезвычайно короткого времени они распадаются на обычные частицы. Таких нестабильных короткоживущих частиц поразительно много: их известно уже несколько сотен.

В 60-70-е годы физики были совершенно сбиты с толку многочисленностью, разнообразием и необычностью вновь открытых субатомных частиц. Казалось, им не будет конца. Совершенно непонятно, для чего столько частиц. Являются ли эти элементарные частицы хаотическими и случайными осколками материи? Или, возможно, они таят в себе ключ к познанию структуры Вселенной? Развитие физики в последующие десятилетия показало, что в существовании такой структуры нет никаких сомнений. В конце ХХ в. физика начинает понимать, каково значение каждой из элементарных частиц.

Миру субатомных частиц присущ глубокий и рациональный порядок. В основе этого порядка - фундаментальные физические взаимодействия.

**1.Фундаментальные физические взаимодействия**

В свой повседневной жизни человек сталкивается с множеством сил, действующих на тела. Здесь и сила ветра или набегающего потока воды, давление воздуха, мощный выброс взрывающихся химических веществ, мускульная сила человека, вес тяжелых объектов, давление квантов света, притяжение и отталкивание электрических зарядов, сейсмические волны, вызывающие подчас катастрофические разрушения, и вулканические извержения, приводившие к гибели цивилизации, и т. д. Одни силы действуют непосредственно при контакте с телом, другие, например, гравитация, действуют на расстоянии, через пространство. Но, как выяснилось в результате развития теоретического естествознания, несмотря на столь большое разнообразие, *все действующие в природе силы можно свести всего лишь к четырем фундаментальным взаимодействиям.* Именно эти взаимодействия в конечном счете отвечают за все изменения в мире, именно они являются источником всех преобразований тел и процессов.

Изучение свойств фундаментальных взаимодействий составляет главную задачу современной физики.

***1.1. Гравитация***

В истории физики гравитация (тяготение) стала первым из четырех фундаментальных взаимодействий предметом научного исследования. После появления в ХVII в. ньютоновской теории гравитации - закона всемирного тяготения - удалось впервые осознать истинную роль гравитации как силы природы. Гравитация обладает рядом особенностей, отличающих ее от других фундаментальных взаимодействий.

Наиболее удивительной особенностью гравитации является ее *малая интенсивность*. Величина гравитационного взаимодействия между компонентами атома водорода составляет 10n , где n = - 3 9 , от силы взаимодействия электрических зарядов. (Если бы размеры атома водорода определялись гравитацией, а не взаимодействием между электрическими зарядами, то низшая (самая близкая к ядру) орбита электрона по размерам превосходила бы доступную наблюдению часть Вселенной!) (Если бы размеры атома водорода определялись гравитацией, а не взаимодействием между электрическими зарядами, то низшая (самая близкая к ядру) орбита электрона по размерам превосходила бы доступную наблюдению часть Вселенной!). Может показаться удивительным, что мы вообще ощущаем гравитацию, коль скоро она так слаба. Как она может оказаться господствующей силой во Вселенной?

Все дело во второй удивительной черте гравитации - ее *универсальности.* Ничто во Вселенной не избавлено от гравитации. Каждая частица испытывает на себе действие гравитации и сама является источником гравитации. Поскольку каждая частица вещества вызывает гравитационное притяжение, гравитация возрастает по мере образования все больших скоплений вещества. Мы ощущаем гравитацию в повседневной жизни потому, что все атомы Земли сообща притягивают нас. И хотя действие гравитационного притяжения одного атома пренебрежимо мало, но результирующая сила притяжения со стороны всех атомов может быть значительной.

Гравитация - *дальнодействующая* сила природы. Это означает, что, хотя интенсивность гравитационного взаимодействия убывает с расстоянием, оно распространяется в пространстве и может сказываться на весьма удаленных от источника телах. В астрономическом масштабе гравитационное взаимодействие, как правило, играет главную роль. Благодаря дальнодействию гравитация не позволяет Вселенной развалиться на части: она удерживает планеты на орбитах, звезды в галактиках, галактики в скоплениях, скопления в Метагалактике.

Сила гравитации, действующая между частицами, всегда представляет собой *силу притяжения*: она стремится сблизить частицы. Гравитационное отталкивание никогда еще не наблюдалось (Хотя в традициях квазинаучной мифологии есть целая область, которая называется левитация - поиск "фактов" антигравитации). Поскольку энергия, запасенная в любой частице, всегда положительна и наделяет ее положительной массой, частицы под действием гравитации всегда стремятся сблизиться.

Чем является гравитация, *неким полем или проявлением искривления пространства-времени*, - на этот вопрос пока еще однозначного ответа нет. Как уже отмечалось нами, существуют разные мнения и концепции физиков на сей счет.

***1.2. Электромагнетизм***

По величине электрические силы намного превосходят гравитационные. В отличие от слабого гравитационного взаимодействия, электрические силы, действующие между телами обычных размеров, можно легко наблюдать. Электромагнетизм известен людям с незапамятных времен (полярные сияния, вспышки молнии и др.).

В течение долгого времени электрические и магнитные процессы изучались независимо друг от друга. Как мы уже знаем, решающий шаг в познании электромагнетизма сделал в середине XIX в. Дж. К. Максвелл, объединивший электричество и магнетизм в единой теории электромагнетизма - первой единой теории поля.

Существование электрона было твердо установлено в 90-e годы прошлого столетия. Ныне известно, что электрический заряд любой частицы вещества всегда кратен фундаментальной единице заряда - своего рода "атому" заряда. Почему это так - чрезвычайно интересный вопрос. Однако не все материальные частицы являются носителями электрического заряда. Например, фотон и нейтрино электрически нейтральны. В этом отношении электричество отличается от гравитации. *Все материальные частицы создают гравитационное поле, тогда как с электромагнитным полем связаны только заряженные частицы.*

Как и электрические заряды, одноименные магнитные полюса отталкиваются, а разноименные - притягиваются. Однако в отличие от электрических зарядов магнитные полюса встречаются не по отдельности, а только парами - северный полюс и южный полюс. Еще с древнейших времен известны попытки получить посредством разделения магнита лишь один изолированный магнитный полюс - монополь. Но все они заканчивались неудачей. Может быть, существование изолированных магнитных полюсов в природе исключено? Определенного ответа на этот вопрос пока не существует. Некоторые теоретические концепции допускают возможность существования монополя.

Как электрическое и гравитационное взаимодействия, взаимодействие магнитных полюсов подчиняется закону обратных квадратов. Следовательно, *электрическая и магнитная силы "дальнодействующие", и их действие ощутимо на больших расстояниях от источника.* Так, магнитное поле Земли простирается далеко в космическое пространство. Мощное магнитное поле Солнца заполняет всю Солнечную систему. Существуют и галактические магнитные поля.

Электромагнитное взаимодействие определяет структуру атомов и отвечает за подавляющее большинство физических и химических явлений и процессов (за исключением ядерных).

***1.3. Слабое взаимодействие***

К выявлению существования слабого взаимодействия физика продвигалась медленно. Слабое взаимодействие ответственно за распады частиц; и поэтому с его проявлением столкнулись с открытием радиоактивности и исследованием бета-распада.

У бета-распада обнаружилась в высшей степени странная особенность. Исследования приводили к выводу, что в этом распаде нарушается один из фундаментальных законов физики - закон сохранения энергии. Казалось, что в этом распаде часть энергии куда-то исчезала. Чтобы "спасти" закон сохранения энергии, В. Паули предположил, что вместе с электроном при бета -распаде вылетает еще одна частица. Она - нейтральная и обладающая необычайно высокой проникающей способностью, вследствие чего ее не удавалось наблюдать. Э. Ферми назвал частицу-невидимку "нейтрино".

Но предсказание и обнаружение нейтрино - это только начало проблемы, ее постановка. Нужно было объяснить природу нейтрино, но здесь оставалось много загадочного. Дело в том, что и электроны и нейтрино испускались нестабильными ядрами. Но было неопровержимо доказано, что внутри ядер таких частиц нет. Как же они возникали? Было высказано предположение, что электроны и нейтрино не существуют в ядре в "готовом виде", а каким-то образом образуются из энергии радиоактивного ядра. Дальнейшие исследования показали, что входящие в состав ядра нейтроны, предоставленные самим себе, через несколько минут распадаются на протон, электрон и нейтрино, т.е. вместо одной частицы появляются три новые. Анализ приводил к выводу, что известные силы не могут вызвать такой распад. Он, видимо, порождался какой-то иной, неизвестной силой. Исследования показали, что этой силе соответствует некоторое слабое взаимодействие.

Оно гораздо слабее электромагнитного, хотя и сильнее гравитационного. Оно распространяется на очень незначительных расстояниях. Радиус слабого взаимодействия очень мал. Слабое взаимодействие прекращается на расстоянии, большем 10n см (где n = - 1 6 ) от источника и потому не может влиять на макроскопические объекты, а ограничивается отдельными субатомными частицами. Впоследствии выяснилось, что большинство нестабильных элементарных частиц участвует в слабом взаимодействии.

Теория слабого взаимодействия была создана в конце б0-х годов С. Вайнбергом и А. Саламом. С момента построения Максвеллом теории электромагнитного поля создание этой теории явилось самым крупным шагом на пути к единству физики.

***10.1.4. Сильное взаимодействие***

Последнее в ряду фундаментальных взаимодействий - сильное взаимодействие, которое является источником огромной энергии. Наиболее характерный пример энергии, высвобождаемой сильным взаимодействием, - это наше Солнце. В недрах Солнца и звезд, начиная с определенного времени, непрерывно протекают термоядерные реакции, вызываемые сильным взаимодействием. Но и человек научился высвобождать сильное взаимодействие: создана водородная бомба, сконструированы и совершенствуются технологии управляемой термоядерной реакции.

К представлению о существовании сильного взаимодействия физика шла в ходе изучения структуры атомного ядра. Какая-то сила должна удерживать протоны в ядре, не позволяя им разлетаться под действием электростатического отталкивания. Гравитация для этого слишком слаба; очевидно, необходимо какое-то новое взаимодействие, причем, более сильное, чем электромагнитное. Впоследствии оно было обнаружено. Выяснилось, что хотя по своей величине сильное взаимодействие существенно превосходит все остальные фундаментальные взаимодействия, но за пределами ядра оно не ощущается. Радиус действия новой силы оказался очень малым. Сильное взаимодействие резко падает на расстоянии от протона или нейтрона, превышающем примерно 10n см (где n = - 13).

Кроме того, выяснилось, что сильное взаимодействие испытывают не все частицы. Его испытывают протоны и нейтроны, но электроны, нейтрино и фотоны не подвластны ему. В сильном взаимодействии участвуют только более тяжелые частицы.

Теоретическое объяснение природы сильного взаимодействия развивалось трудно. Прорыв наметился в начале 60-х годов, когда была предложена кварковая модель. В этой теории нейтроны и протоны рассматриваются не как элементарные частицы, а как составные системы, построенные из кварков.

Таким образом, в фундаментальных физических взаимодействиях четко прослеживается различие сил дальнодействующих и близкодействующих. С одной стороны, имеют место взаимодействия неограниченного радиуса действия (гравитация, электромагнетизм), а с другой - взаимодействия малого радиуса действия (сильное и слабое). Мир физических элементов в целом развертывается в единстве этих двух полярностей и является воплощением единства предельно малого и предельно большого - близкодействия в микромире и дальнодействия во всей Вселенной.

***1.5. Проблема единства физики***

Познание есть обобщение действительности, и поэтому цель науки - поиск единства в природе, связывание разрозненных фрагментов знания в единую картину. Для того чтобы создать единую систему, нужно открыть связующее звено между различными отраслями знания, некоторое фундаментальное отношение. Поиск таких связей и отношений - одна из главных задач научного исследования. Всякий раз, когда удается установить такие новые связи, значительно углубляется понимание окружающего мира, формируются новые способы познания, которые указывают путь к не известным ранее явлениям.

Установление глубинных связей между различными областями природы - это одновременно и синтез знания, и метод, направляющий научные исследования по новым, непроторенным дорогам. Выявление Ньютоном связи между притяжением тел в земных условиях и движением планет ознаменовало собой рождение классической механики, на основе которой построена технологическая база современной цивилизации. Установление связи термодинамических свойств газа с хаотическим движением молекул поставило на прочную основу атомно-молекулярную теорию вещества. В середине прошлого столетия Максвелл создал единую электромагнитную теорию, охватившую как электрические, так и магнитные явления. Затем в 20-х г. нашего века Эйнштейн предпринимал попытки объединить в единой теории электромагнетизм и гравитацию.

Но к середине ХХ в. положение в физике радикально изменилось: были открыты два новых фундаментальных взаимодействия - сильное и слабое, т.е. при создании единой физики приходится считаться уже не с двумя, а с четырьмя фундаментальными взаимодействиями. Это несколько охладило пыл тех, кто надеялся на быстрое решение данной проблемы. Но сам замысел под сомнение всерьез не ставился, и увлеченность идеей единого описания не прошла.

Существует точка зрения, что все четыре (или хотя бы три) взаимодействия представляют собой явления одной природы и должно быть найдено их единое теоретическое описание. Перспектива создания единой теории мира физических элементов на основе одного-единственного фундаментального взаимодействия остается весьма привлекательной. Это главная мечта физиков ХХ в. Но долгое время она оставалась лишь мечтой, и очень неопределенной.

Однако во второй половине ХХ в. появились предпосылки осуществления этой мечты и уверенность, что это дело отнюдь не отдаленного будущего. Похоже, что вскоре она вполне может стать реальностью. Решающий шаг на пути к единой теории был сделан в 6О-70-х гг. с созданием сначала теории кварков, а затем и теории электрослабого взаимодействия. Есть основания для мнения, что мы стоим на пороге более могущественного и глубокого объединения, чем когда-либо ранее. Среди физиков усиливается убеждение, что начинают вырисовываться контуры единой теории всех фундаментальных взаимодействий - Великого объединения.

**2. Классификация элементарных частиц**

***2.1. Характеристики субатомных частиц***

Исторически первыми экспериментально обнаруженными элементарными частицами были электрон, протон, а затем нейтрон. Казалось, что этих частиц и фотона (кванта электромагнитного поля) достаточно для построения известных форм вещества - атомов и молекул. Вещество при таком подходе строилось из протонов, нейтронов и электронов, а фотоны осуществляли взаимодействие между ними. Однако, вскоре выяснилось, что мир устроен значительно сложнее. Было установлено, что каждой частице соответствует своя античастица, отличающаяся от нее лишь знаком заряда. Для частиц с нулевыми значениями всех зарядов античастица совпадает с частицей (пример - фотон). Далее, по мере развития экспериментальной ядерной физики к этим частицам добавилось еще свыше 300 частиц (!).

Характеристиками субатомных частиц являются масса, электрический заряд, спин (собственный момент количества движения), время жизни частицы, магнитный момент, пространственная четность, лептонный заряд, барионный заряд и др.

Когда говорят о массе частицы, имеют в виду ее массу покоя, поскольку эта масса не зависит от состояния движения. Частица, имеющая нулевую массу покоя, движется со скоростью света (фотон). Нет двух частиц с одинаковыми массами. Электрон - самая легкая частица с ненулевой массой покоя. Протон и нейтрон тяжелее электрона почти в 2000 раз. А самая тяжелая из известных элементарных частиц (Z -частицы) обладает массой в 200 000 раз больше массы электрона.

Электрический заряд меняется в довольно узком диапазоне и всегда кратен фундаментальной единице заряда - заряду электрона (-1). Некоторые частицы (фотон, нейтрино) вовсе не имеют заряда.

Важная характеристика частицы - спин. Он также всегда кратен некоторой фундаментальной единице, которая выбрана равной Ѕ . Так, протон, нейтрон и электрон имеют спин Ѕ , а спин фотона равен 1. Известны частицы со спином 0, 3 / 2 , 2. Частица со спином 0 при любом угле поворота выглядит одинаково. Частицы со спином 1 принимают тот же вид после полного оборота на 360° . Частица со спином 1/2 приобретает прежний вид после оборота на 720° и т.д. Частица со спином 2 принимает прежнее положение через пол-оборота (180° ). Частиц со спином более 2 не обнаружено, и возможно их вообще не существует. В зависимости от спина, все частицы делятся на две группы:

* бозоны - частицы со спинами 0,1 и 2;
* фермионы - частицы с полуцелыми спинами (Ѕ ,3 / 2 )

Частицы характеризуются и временем их жизни. По этому признаку частицы делятся на стабильные и нестабильные. Стабильные частицы - это электрон, протон, фотон и нейтрино. Нейтрон стабилен, когда находится в ядре атома, но свободный нейтрон распадается примерно за 15 минут. Все остальные известные частицы - нестабильны; время их жизни колеблется от нескольких микросекунд до 1 0 n сек (где n = - 2 3 ).

Большую роль в физике элементарных частиц играют законы сохранения, устанавливающие равенство между определенными комбинациями величин, характеризующих начальное и конечное состояние системы. Арсенал законов сохранения в квантовой физике больше, чем в классической. Он пополнился законами сохранения различных четностей (пространственной, зарядовой), зарядов (лептонного, барионного и др.), внутренних симметрий, свойственных тому или иному типу взаимодействия.

Выделение характеристик отдельных субатомных частиц - важный, но только начальный этап познания их мира. На следующем этапе нужно еще понять, какова роль каждой отдельной частицы, каковы ее функции в и структуре материи.

Физики выяснили, что прежде всего свойства частицы определяются ее способностью (или неспособностью) участвовать в сильном взаимодействии. Частицы, участвующие в сильном взаимодействии, образуют особый класс и называются *адронами.* Частицы, участвующие в слабом взаимодействии и не участвующие в сильном, называются *лептонами*. Кроме того, существуют *частицы - переносчики взаимодействий*.

Рассмотрим свойства этих основных типов частиц.

***2.2. Лептоны***

Хотя лептоны могут иметь электрический заряд, а могут и не иметь, спин у всех у них равен Ѕ . Среди лептонов наиболее известен электрон. Электрон - это первая из открытых элементарных частиц. Как и все остальные лептоны, электрон, по-видимому, является элементарным (в собственном смысле этого слова) объектом. Насколько известно, электрон не состоит из каких-то других частиц.

Другой хорошо известный лептон - нейтрино. Нейтрино являются наиболее распространенными частицами по Вселенной. Вселенную можно представить безбрежным нейтринным морем, в котором изредка встречаются острова в виде атомов. Но несмотря на такую распространенность нейтрино, изучать их очень сложно. Как мы уже отмечали, нейтрино почти неуловимы. Не участвуя ни в сильном, ни в электромагнитном взаимодействиях, они проникают через вещество, как будто его вообще нет. Нейтрино - это некие "призраки физического мира".

Достаточно широко распространены в природе мюоны, на долю которых приходится значительная часть космического излучения. Во многих отношениях мюон напоминает электрон: имеет тот же заряд и спин, участвует в тех те взаимодействиях, но имеет большую массу и нестабилен. Примерно за две миллионные доли секунды мюон распадается на электрон и два нейтрино. В конце 70-х годов был обнаружен третий заряженный лептон, получивший название "тау - лептон". Это очень тяжелая частица. Ее масса около 3500 масс электрона. Но во всем остальном он ведет себя подобно электрону и мюону.

В 60-х годах список лептонов значительно расширился. Было установлено, что существует несколько типов нейтрино: электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино. Таким образом, общее число разновидностей нейтрино равно трем, а общее число лептонов - шести. Разумеется, у каждого лептона есть своя античастица; таким образом, общее число различных лептонов равно двенадцати. Нейтральные лептоны участвуют только в слабом взаимодействии; заряженные - в слабом и электромагнитном.

**Таблица (**Античастицы в таблицу не включены**)**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Название** | **Масса** | **Заряд** |
| Электрон | 1 | -1 |
| Мюон | 206,7 | -1 |
| Тау-лептон | 3536,0 | -1 |
| Электронное нейтрино | 0 | 0 (Имеются данные, свидетельствующие о том, что нейтрино могут обладать небольшой массой) |
| Мюонное нейтрино | 0 | 0 |
| Тау-нейтрино | 0 | 0 |

***2.3. Адроны***

Если лептонов существует чуть свыше десятка, то адронов сотни. Такое множество адронов наводит на мысль, что адроны не элементарные частицы, а построены из более мелких частиц. Все адроны встречаются в двух разновидностях - электрически заряженные и нейтральные. Среди адронов наиболее известны и широко распространены нейтрон и протон. Остальные адроны короткоживущие и быстро распадаются. Это класс т.н. барионов (тяжелые частицы гипероны) и большое семейство мезонов (мезонные резонансы).Адроны участвуют в сильном, слабом и электромагнитном взаимодействиях.

Существование и свойства большинства известных адронов были установлены в опытах на ускорителях. Открытие множества разнообразных адронов в 50-60-x годах крайне озадачило физиков. Но со временем адроны удалось классифицировать по массе, заряду и спину. Постепенно стала выстраиваться более или менее четкая картина. Появились конкретные идеи о том, как систематизировать хаос эмпирических данных, раскрыит тайну адронов в научной теории. Решающий шаг здесь был сделан в 1963 г., когда была предложена теория кварков.

***2.4. Частицы - переносчики взаимодействий***

Перечень известных частиц не исчерпывается перечисленными частицами - лептами и адронами - образующих строительный материал вещества. В этот перечень не включен, например фотон. Есть еще один тип частиц, которые не являются непосредственно строительным материалом материи, а обеспечивают четыре фундаментальных взаимодействия, т.е. образуют своего рода "клей", не позволяющий миру распадаться на части.

Переносчиком электромагнитного взаимодействия выступает *фотон*. Теория электромагнитного взаимодействия была представлена квантовой электродинамикой.

Переносчики сильного взаимодействия - *глюоны*. Глюоны - переносчики взаимодействия между кварками, связывающие их попарно или тройками.

Переносчики слабого взаимодействия три частицы - W ± и Z ° *бозоны*. Они были открыты лишь в 1983 г. Радиус слабого взаимодействия чрезвычайно мал, поэтому его переносчиками должны быть частицы с большими массами покоя. В соответствии с принципом неопределенности время жизни частиц с такой большой массой покоя должно быть чрезвычайно коротким - всего лишь около 10 n сек (где n = - 2 6 ). Радиус переносимого этими взаимодействия очень мал потому, что столь короткоживущие частицы не успевают отойти особенно далеко.

Высказывается мнение, что возможно существование и переносчика гравитационного поля - *гравитона* (в тех теориях гравитации, которые рассматривают ее не (только) как следствие искривления пространства-времени, а как поле). Спин гравитона равен 2. В принципе гравитоны можно зафиксировать в эксперименте. Но поскольку гравитационное взаимодействие очень слабое и в квантовых процессах практически не проявляется, то непосредственно зафиксировать гравитоны очень сложно.

Классификация частиц на лептоны, адроны и переносчики взаимодействий исчерпывает мир известных нам субатомных частиц. Каждый вид частиц играет свою роль в формировании структуры материи и Вселенной.

**3. Теории элементарных частиц**

***3.1. Квантовая электродинамика (КЭД)***

Квантовая механика позволяет описывать движение элементарных частиц, но не их порождение или уничтожение, т. е. применяется лишь для описания систем с неизменным числом частиц. Обобщением квантовой механики является квантовая теория поля - это квантовая теория систем с бесконечным числом степеней свободы (физических полей). Потребность в такой теории порождается квантово-волновым дуализмом, существованием волновых свойств у всех частиц. В квантовой теории поля взаимодействие представляют как результат обмена квантами поля.

В середине ХХ в. была создана теория электромагнитного взаимодействия - квантовая электродинамика КЭД - это продуманная до мельчайших деталей и оснащенная совершенным математическим аппаратом теория взаимодействия фотонов и электронов. В основе КЭД - описание электромагнитного взаимодействия с использованием понятия виртуальных фотонов - его переносчиков. Эта теория удовлетворяет основным принципам как квантовой теории, так и теории относительности.

В центре теории анализ актов испускания или поглощения одного фотона одной заряженной частицей, а также аннигиляции электронно-позитронной пары в фотон или порождение фотонами такой пары.

Если в классическом описании электроны представляются в виде твердого точечного шарика, то в КЭД окружающее электрона электромагнитное поле рассматривается как облако виртуальных фотонов, которое неотступно следует за электроном, окружая его квантами энергии. После того, как электрон испускает фотон, тот порождает (виртуальную) электрон-позитронную пору, которая может аннигилировать с образованием нового фотона. Последний может поглотиться исходным фотоном, но может породить новую пару и т.д. Таким образом электрон покрывается облаком виртуальных фотонов, электронов и позитронов, находящихся в состоянии динамического равновесия. Фотоны возникают и исчезают очень быстро, а электроны движутся в пространстве не по вполне определенным траекториям. Еще можно тем или иным способом определить начальную и конечную точки пути - до и после рассеяния, но сам путь в промежутке между началом и концом движения остается неопределенным.

Описание взаимодействия с помощью частицы-переносчика привело к расширению понятия фотона. Вводятся понятия реального (кванта видимого нами света) и виртуального (скоротечного, призрачного) фотона, который "видят" только заряженные частицы, претерпевающие рассеяние.

Чтобы проверить, согласуется ли теория с реальностью, физики сосредоточили внимание на двух эффектах, представлявших особый интерес. Первый касался энергетических уровней атома водорода - простейшего атома. Согласно КЭД, уровни должны быть слегка смещены относительно положения, которое они занимали бы в отсутствие виртуальных фотонов. Вторая решающая проверка КЭД касалась чрезвычайно малой поправки к собственному магнитному моменту электрона. Теоретические и экспериментальные результаты проверки КЭД совпадают с высочайшей точностью - более девяти знаков после запятой. Столь поразительное соответствие дает право считать КЭД наиболее совершенной из существующих естественно-научных теорий.

После подобного триумфа КЭД была принята как модель для квантового описания трех других фундаментальных взаимодействий. Разумеется, полям, связанным с другими взаимодействиями, должны соответствовать иные частицы-переносчики.

***3.2. Теория кварков***

Теория кварков - это теория строения адронов. Основная идея этой теории очень проста. Все адроны построены из более мелких частиц, называемых кварками. Значит, кварки - это более элементарные частицы, чем адроны. Кварки несут дробный электрический заряд: они обладают зарядом, величина которого составляет либо -1 / 3 или +2 / 3 фундаментальной единицы - заряда электрона. Комбинация из двух и трех кварков может иметь суммарный заряд, равный нулю или единице. Все кварки имеют спин Ѕ ,поэтому они относятся к фермионам. Основоположники теории кварков Гелл-Манн и Цвейг, чтобы учесть все известные в 60-е гг. адроны ввели три сорта (аромата) кварков: u (от up- верхний), d (от down- нижний) и s (от strange - странный).

Кварки могут соединяться друг с другом одним из двух возможных способов: либо тройками, либо парами кварк - антикварк. Из трех кварков состоят сравнительно тяжелые частицы - барионы, что означает "тяжелые частицы". Наиболее известны из барионов нейтрон и протон. Более легкие пары кварк - антикварк образуют частицы, получившие название мезоны - "промежуточные частицы". Например, протон состоит из двух u- и одного d-кварков (uud), а нейтрон - из двух d-кварков и одного u-кварка (udd).Чтобы это "трио" кварков не распадалось, необходима удерживающая их сила, некий "клей".

Оказалось, что результирующее взаимодействие между нейтронами и протонами в ядре представляет собой просто остаточный эффект более мощного взаимодействия между самими кварками. Это объяснило, почему сильное взаимодействие кажется столь сложным. Когда протон "прилипает" к нейтрону или другому протону, во взаимодействии участвуют шесть кварков, каждый из которых взаимодействует со всеми остальными. Значительная часть сил тратится на прочное склеивание трио кварков, а небольшая - на скрепление двух трио кварков друг с другом. (Но выяснилось, что кварки участвуют и в слабом взаимодействии. Слабое взаимодействие может изменять аромат кварка. Именно так происходит распад нейтрона. Один из d-кварков в нейтроне превращается в u-кварк, а избыток заряда уносит рождающийся одновременно электрон. Аналогичным образом, изменяя аромат, слабое взаимодействие приводит к распаду и других адронов.)

То обстоятельство, что из различных комбинаций трех основных частиц можно получить все известные адроны, стало триумфом теории кварков. Но в 70-е гг. были открыты новые адроны (пси-частицы, ипсилон-мезон и др.). Этим был нанесен удар первому варианту теории кварков, поскольку в ней уже не было места ни для одной новой частицы. Все возможные комбинации из кварков и их антикварков были уже исчерпаны.

Проблему удалось решить за счет введения трех новых ароматов. Они получили название

- charm (очарование), или с; b -кварк (от bottom - дно, а чаще beauty - красота, или прелесть); впоследствии был введен еще один аромат - t ( от top - верхний).

Кварки скрепляются между собой сильным взаимодействием. Переносчики сильного взаимодействия - глюоны (цветовые заряды). Область физики элементарных частиц, изучающая взаимодействие кварков и глюонов, носит название квантовой хромодинамики . Как квантовая электродинамика - теория электромагнитного взаимодействия, так квантовая хромодинамика - теория сильного взаимодействия.

Хотя и существует некоторая неудовлетворенность кварковой схемой, большинство физиков считает кварки подлинно элементарными частицами - точечными, неделимыми и не обладающими внутренней структурой. В этом отношении они напоминают лептоны, и уже давно предполагается, что между этими двумя различными, но сходными по своей структуре семействами должна существовать глубокая взаимосвязь.

Таким образом, наиболее вероятное число истинно элементарных частиц (не считая переносчиков фундаментальных взаимодействий) на конец ХХ века равно 48. Из них: лептонов (6х2) = 12 плюс кварков (6х3)х2 =36.

***3.3. Теория электрослабого взаимодействия***

В 70-е ХХ века в естествознании произошло выдающееся событие: два взаимодействия из четырех физики объединили в одно. Картина фундаментальных оснований природы несколько упростилась. Электромагнитное и слабое взаимодействия, казалось бы весьма разные по своей природе, в действительности оказались двумя разновидностями единого т.н. электрослабого взаимодействия. Теория электрослабого взаимодействия решающим образом повлияла на дальнейшее развитие физики элементарных частиц в конце ХХ в.

Главная идея в построении этой теории состояла в описании слабого взаимодействия на языке концепции калибровочного поля, в соответствии с которой ключом к пониманию природы взаимодействий служит симметрия. Одна из фундаментальных идей в физике второй половины ХХ в. - это убеждение, что все взаимодействия существуют лишь для того, чтобы поддерживать в природе некий набор абстрактных симметрий. Какое отношение имеет симметрия к фундаментальным взаимодействиям? На первый взгляд, само предположение о существовании подобной связи кажется парадоксальным и непонятным.

Прежде всего о том, что понимается под симметрией. Принято считать, что предмет обладает симметрией, если предмет остается неизменным в результате проведения той или иной операции по его преобразованию. Так, сфера симметрична, потому что выглядит одинаково при повороте на любой угол относительно ее центра. Законы электричества симметричны относительно замены положительных зарядов отрицательными и наоборот. *Таким образом, под симметрией мы понимаем инвариантность относительно некой операции.*

Существуют разные типы симметрий: геометрические, зеркальные, негеометрические. Среди негеометрических есть так называемые калибровочные симметрии. Калибровочные симметрии носят абстрактный характер и непосредственно не фиксируются. Они связаны с изменением отсчета *уровня, масштаба или значения* некоторой физической величины*. Система обладает калибровочной симметрией, если ее природа остается неизменной при такого рода преобразовании.* Так, например, в физике работа зависит от разности высот, а не от абсолютной высоты; напряжение - от разности потенциалов, а не от их абсолютных величин и др. Симметрии, на которых основан пересмотр понимания четырех фундаментальных взаимодействий, именно такого рода. Калибровочные преобразования могут быть глобальными и локальными. Калибровочные преобразования, изменяющиеся от точки к точке, известны под названием "локальных" калибровочных преобразований. В природе существует целый ряд локальных калибровочных симметрий и необходимо соответствующее число полей для компенсации этих калибровочных преобразований. *Силовые поля можно рассматривать как средство, с помощью которого в природе создаются присущие ей локальные калибровочные симметрии.* Значение концепции калибровочной симметрии заключается в том, что благодаря ей теоретически моделируются все четыре фундаментальных взаимодействия, встречающиеся в природе. Все их можно рассматривать как калибровочные поля.

Представляя слабое взаимодействие в виде калибровочного поля, физики исходят из того, что все частицы, участвующие в слабом взаимодействии, служат источниками поля нового типа - поля слабых сил. Слабо взаимодействующие частицы, такие, как электроны и нейтрино, являются носителями "слабого заряда", который аналогичен электрическому заряду и связывает эти частицы со слабым полем.

Для представления поля слабого взаимодействия как калибровочного прежде всего необходимо установить точную форму соответствующей калибровочной симметрии. Дело в том, что симметрия слабого взаимодействия гораздо сложнее электромагнитного. Ведь и сам механизм этого взаимодействия оказывается более сложным. Во-первых, при распаде нейтрона, например, в слабом взаимодействии участвуют частицы по крайней мере четырех различных типов (нейтрон, протон, электрон и нейтрино). Во-вторых, действие слабых сил приводит к изменению их природы (превращению одних частиц в другие за счет слабого взаимодействия). Напротив, электромагнитное взаимодействие не изменяет природы участвующих в нем частиц.

Это определяет то обстоятельство, что слабому взаимодействию соответствует более сложная калибровочная симметрия, связанная с изменением природы частиц. Выяснилось, что для поддержания симметрии здесь необходимы три новых силовых поля, в отличие от единственного электромагнитного поля. Было получено и квантовое описание этих трех полей: должны существовать три новых типа частиц - переносчиков взаимодействия, по одному для каждого поля. Все весте они называются тяжелыми векторными бозонами со спином 1 и являются переносчиками слабого взаимодействия.

Частицы W + и W - являются переносчиками двух из трех связанных со слабым взаимодействием полей. Третье поле соответствует электрически нейтральной частице-переносчику, получившей название Z -частицы. Существование Z -частицы означает, что слабое взаимодействие может не сопровождаться переносом электрического заряда.

В создании теории электрослабого взаимодействия ключевую роль сыграло понятие спонтанного нарушения симметрии: не всякое решение задачи обязано обладать всеми свойствами его исходного уровня. Так, частицы, совершенно разные при низких энергиях, при высоких энергиях могут оказаться на самом деле одной и той же частицей, но находящейся в разных состояниях. Опираясь на идею спонтанного нарушения симметрии, авторы теории электрослабого взаимодействия Вайнберг и Салам сумели решить великую теоретическую проблему - они совместили казалось бы несовместимые вещи (значительная масса переносчиков слабого взаимодействия, с одной стороны, и идею калибровочной инвариантности, которая предполагает дальнодействующий характер калибровочного поля, а значит нулевую массу покоя частиц-переносчиков, с другой) и таким образом соединили электромагнетизм и слабое взаимодействие в единой теории калибровочного поля.

В этой теории представлено всего четыре поля: электромагнитное поле и три поля, соответствующие слабым взаимодействиям. Кроме того, введено постоянное на всем пространстве скалярное поле (т. н. поля Хиггса), с которым частицы взаимодействуют по разному, что и определяет различие их масс. (Кванты скалярного поля представляют собой новые элементарные частицы с нулевым спином. Их называют хиггсовскими (по имени физика П.Хиггса, предположившего их существование). Число таких хиггсовских бозонов может достигать нескольких десятков. На опыте такие бозоны пока не обнаружены. Более того, ряд физиков считает их существование необязательным, но совершенной теоретической модели без хиггсовскмих бозонов пока не найдено) Первоначально W и Z -кванты не имеют массы, но нарушение симметрии приводит к тому, что некоторые частицы Хиггса сливаются с W и Z -частицами, наделяя их массой.

Различия свойств электромагнитного и слабого взаимодействий теория объясняет нарушением симметрии. Если бы симметрия не нарушалась, то оба взаимодействия были бы сравнимы по величине. Нарушение симметрии влечет за собой резкое уменьшение слабого взаимодействия. Можно сказать, что слабое взаимодействие имеет столь малую величину потому, что W и Z -частицы очень массивны. Лептоны редко сближаются на столь малые расстояния (r < 1 0 n см., где n = - 1 6 ). Но при больших энергиях (> 1 0 0 Гэв), когда частицы W и Z могут свободно рождаться, обмен W и Z бозонами осуществляется столь же легко, как и обмен фотонами (безмассовыми частицами). Разница между фотонами и бозонами стирается.В этих условиях должно существовать полная симметрия между электромагнитным и слабым взаимодействием - электрослабое взаимодействие.

Проверка новой теории заключалась в подтверждении существования гипотетических W и Z -частиц. Их открытие стало возможным только с созданием очень больших ускорителей новейшего типа. Открытие в 1983 г. W и Z -частиц означало торжество теории электрослабого взаимодействия. Не было больше нужды говорить о четырех фундаментальных взаимодействиях. Их осталось три.

***3.4. Квантовая хромодинамика***

Следующий шаг на пути Великого объединения фундаментальных взаимодействий - слияние сильного взаимодействия с электрослабым. Для этого необходимо придать черты калибровочного поля сильному взаимодействию и ввести обобщенное представление об изотопической симметрии. Сильное взаимодействие можно представлять как результат обмена глюонами, который обеспечивает связь кварков (попарно или тройками) в адроны.

Замысел здесь состоит в следующем. Каждый кварк обладает аналогом электрического заряда, служащим источником глюонного поля. Его назвали цветом (Разумеется, это название не имеет никакого отношения к обычному цвету). Если электромагнитное поле порождается зарядом только одного сорта, то для создания более сложного глюонного поля потребовалось три различных цветовых заряда. Каждый кварк "окрашен" в один из трех возможных цветов, которые совершенно произвольно были названы красным, зеленым и синим. И соответственно антикварки бывают антикрасные, антизеленые и антисиние.

На следующем этапе теория сильного взаимодействия развивается по той же схеме, что и теория слабого взаимодействия. Требование локальной калибровочной симметрии (т.е. инвариантности относительно изменений цвета в каждой точке пространства) приводит к необходимости введения компенсирующих силовых полей. Всего требуется восемь новых компенсирующих силовых полей. Частицами - переносчиками этих полей являются глюоны, и, таким образом, из теории следует, что должно быть целых восемь различных типов глюонов. (В то время как переносчик электромагнитного взаимодействия - всего лишь один (фотона), а переносчиков слабого взаимодействия - три.) Глюоны имеют нулевую массу покоя и спин 1. Глюоны также имеют различные цвета, но не чистые, а смешанные (например, сине-антизеленый). Поэтому, испускание или поглощение глюона сопровождается изменением цвета кварка ("игра цветов"). Так, например, красный кварк, теряя красно-антисиний глюон, превращается в синий кварк, а зеленый кварк, поглощая сине-антизеленый глюон, превращается в синий кварк. В протоне, например, три кварка постоянно обмениваются глюонами, изменяя свой цвет. Однако такие изменения носят не произвольный характер, а подчиняются жесткому правилу: в любой момент времени "суммарный" цвет трех кварков должен представлять собой белый свет, т.е. сумму "красный + зеленый + синий". Это распространяется и на мезоны, состоящие из пары кварк - антикварк. Поскольку антикварк характеризуется антицветом, такая комбинация заведомо бесцветна ("белая"), например красный кварк в комбинации с антикрасным кварком образует бесцветный мезон.

С точки зрения квантовой хромодинамики (квантовой теории цвета) сильное взаимодействие есть не что иное, как стремление поддерживать определенную абстрактную симметрию природы: сохранение белого цвета всех адронов при изменении цвета их составных частей. Квантовая хромодинамика великолепно объясняет правила, которым подчиняются все комбинации кварков, взаимодействие глюонов между собой (глюон может распадаться на два глюона или два глюона слить в один - поэтому и появляются нелинейные члены в уравнении глюонного поля), сложную структуру адрона, состоящего из "одетых" в облака кварков и др.

Возможно, пока преждевременно оценивать квантовую хромодинамику как окончательную и завершенную теорию сильного взаимодействия, тем не менее ее достижения многообещающи.

***3.5. На пути к... Великому объединению***

С созданием квантовой хромодинамики появилась надежда на создание единой теории всех (или хотя бы трех из четырех) фундаментальных взаимодействий. *Модели единым образом описывающие хотя бы три из четырех фундаментальных взаимодействий, называются моделями Великого объединения. Теоретические схемы, в рамках которых объединяются все известные типы взаимодействий (сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное) называются моделями супергравитации.*

Опыт успешного объединения слабого и электромагнитного взаимодействий на основе идеи калибровочных полей подсказал возможные пути дальнейшего развития принципа единства физики, объединения фундаментальных физических взаимодействий. Один из них основан на том удивительном факте, что константы взаимодействия электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий становятся равными друг другу при одной и той же энергии. Эту энергию называли *энергией объединения*. При энергии более 1 0 n ГэВ, где n = 1 4 или на расстояниях r < 1 0 n см, где n = - 2 9 , сильные и слабые взаимодействия описываются единой константой, т. е. имеют общую природу. Кварки и лептоны здесь практически не различимы.

В 70-90 -е годы было разработано несколько конкурирующих между собой теорий Великого объединения. Все они основаны на одной и той же идее. Если электрослабое и сильное взаимодействия в действительности представляют собой лишь две стороны великого единого взаимодействия, то последнему также должно соответствовать калибровочное поле с некоторой сложной симметрией. Она должна быть достаточно общей, способной охватить все калибровочные симметрии, содержащиеся и в квантовой хромодинамике и в теории электрослабого взаимодействия. Отыскание такой симметрии - главная задача на пути создания единой теории сильного и электрослабого взаимодействия. Существуют разные подходы, порождающие конкурирующих варианты теорий Великого объединения.

Тем не менее все эти гипотетические варианты Великого объединения имеют ряд общих особенностей.

**Во - первых**, во всех гипотезах кварки и лептоны - носители сильного и электрослабого взаимодействий - включаются в единую теоретическую схему. До сих пор они рассматривались как совершенно различные объекты.

**Во - вторых**, привлечение абстрактных калибровочных симметрий приводит к открытию новых типов полей, обладающих новыми свойствами, например способностью превращать кварки в лептоны. В простейшем варианте теории Великого объединения для превращения кварков в лептоны требуется двадцать четыре поля. Двенадцать из квантов эти полей уже известны: фотон, две W -частицы, Z -частица и восемь глюонов. Остальные двенадцать квантов - новые сверхтяжелые промежуточные бозоны, объединенные общим названием Х и У -частицы (с электрическим зарядом 1 / 3 и 4 / 3 ). Эти кванты соответствуют полям, поддерживающим более широкую калибровочную симметрию и перемешивающим кварки с лептонами. Следовательно, кванты этих полей (т.е. Х и У -частицы) могут превращать кварки в лептоны (и наоборот).

На основе теорий Великого объединения предсказаны по крайней мере две важных закономерности, которые могут и должны быть проверены экспериментально: нестабильность протона и существование магнитных монополей. Экспериментальное обнаружение распада протона и магнитных монополей могло бы стать веским доводом в пользу теорий Великого объединения. На проверку этих предсказаний направлены усилия экспериментаторов. Но пока еще твердо установленных экспериментальных данных на этот счет нет. Дело в том, что теории Великого объединения имеют дело с энергией частиц выше 1 0 n ГэВ, где n = 1 4 . Это очень высокая энергия. Трудно сказать, когда удастся получить частицы столь высоких энергий в ускорителях. Этим объясняется, в частности, трудность обнаружения Х и У- бозонов. И потому основной областью применения и проверки теорий Великого объединения является космология. Без этих теорий невозможно описать раннюю стадию эволюции Вселенной, когда температура первичной плазмы достигала 1 0 n К, где n = 2 7 . Именно в таких условиях могли рождаться и аннигилировать сверхт

**Список литературы**

Азимов А. Краткая история биологии. М.,1967.

Алексеев В.П. Становление человечества. М.,1984. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание. М.,1961 Борн М. Эйнштейновская теория относительности.М.,1964.

Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. М.,1981.

Гинзбург В.Л.О теории относительности. М.,1979.

Дорфман Я.Г. Всемирная история физики с начала 19 века до середины 20 века. М.,1979.

Кемп П., Армс К. Введение в биологию. М.,1986.

Кемпфер Ф. Путь в современную физику. М.,1972.

Либберт Э. Общая биология. М.,1978 Льоцци М. История физики. М.,1972.

Моисеев Н.Н. Человек и биосфера. М.,1990.

Мэрион Дж. Б. Физика и физический мир. М.,1975

Найдыш В.М. Концепции современного естествознания. Учебное пособие. М.,1999.

Небел Б. Наука об окружающей среде. Как устроен мир. М.,1993.

Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.,1990.

Пригожин И.,Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.,1986.

Пригожин И., Стенгерс И. Время, Хаос и Квант. М.,1994.

Пригожин И. От существующего к возникающему. М.,1985.

Степин В.С. Философская антропология и философия науки. М.,1992.

Фейнберг Е.Л. Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке. М.,1992.

Фролов И.Т. Перспективы человека. М.,1983.