**Физика элементарных частиц и t-кварк**

Н.Никитин

Данное вступительное слово расчитано на неспециалистов. В нем кратко обрисоввываются контуры современной физики высоких энергий и даются ответы на некоторые распространенные вопросы, возникающие у любителей науки при первом знакомстве с квантовой теорией. Подготовленный читатель может пропустить вступительное слово и сразу перейти к чтению статьи Дональда Перкинса "Открытие t-кварка". А читатель, знакомый с методами квантовой теории поля, способен понять и не только все написанное Д.Перкинсом, но и дополнительные вычисления, приведенные в разделе "Комментарии переводчика".

История исследования элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий насчитывает более двух с половиной тысяч лет и восходит к идеям древнегреческих натурфилософов о строении Мира. Однако серьезная научная разработка данного вопроса началась только в конце XIX-го века. В 1897 году выдающийся английский физик-экспериментатор Дж.Дж.Томсон определил отношение заряда электрона к его массе. Тем самым, электрон окончательно обрел статус реального физического объекта и стал первой известной элементарной частицей в истории человечества.

За сто с небольшим лет физики провели тысячи сложнейших и точнейших экспериментов, призванных отыскать другие элементарные частицы и выявить фундаментальные взаимодействия между ними. Результаты экспериментов объяснялись серией последовательно сменявших друг друга теорий. Последняя в их ряду - Стандартная модель взаимодействия элементарных частиц (СМ), включающая в себя минимальную модель электрослабого взаимодействия Глэшоу-Вайнберга-Салама и Квантовую хромодинамику (КХД). Можно сказать, что на сегодняшний день именно СМ является реальным итогом многолетней работы сотен тысяч людей от "высоколобых" теоретиков до простых инженеров и лаборантов. Схему СМ можно уложить в несколько абзацев.

На сегодняшний день считается, что в Мире существуют три фундаментальных взаимодействия. Это гравитационное, электрослабое и сильное. При энергиях много меньших, чем примерно 90 ГэВ (1 ГэВ, т.е. 1 Гигаэлектронвольт = 109 электронвольт), электрослабое взаимодействие "расщепляется" на два: хорошо всем знакомое электромагнитное и проявляющееся только в мире элементарных частиц слабое взаимодействие. Заметим, что сильное взаимодействие, аналогично слабому, проявляется исключительно в микромире. Это связано с тем, что слабое и сильное взаимодействия обладают конечными и весьма малыми радиусами действия порядка 10-16см и 10-13см, соответственно. Радиусы действия гравитационного и электромагнитного взаимодействий - бесконечны, а потому гравитация и электромагнетизм проявляют себя на макроскопическом уровне. Однако в микромире во всем диапазоне энергий, доступных для экспериментального изучения, гравитация слаба и ею можно пренебречь.

Появление электрослабого взаимодействия не должно удивлять читателей. В течении всей своей истории физика двигается в направлении объединения взаимодействий. Ньютон - первый, кто пошел по пути отыскания универсальных фундаментальный физических законов. Закон всемирного тяготения впервые продемонстрировал, что два считавшихся раннее принципиально различными движения: движение планет по небу и движение тел под действием силы тяжести у поверхности Земли нужно рассматривать с единых позиций. Примерно через 150 лет Д.К.Максвелл показал, что электрические и магнитные явления суть две стороны универсального электромагнитного взаимодействия. Физики XX-го столетия, среди которых особенно стоит выделить Ш.Глэшоу, С.Вайнберга, А.Салама и К.Руббиа, теоретически и экспериментально доказали, что взаимодействия столь разной природы как слабое и электромагнитное на самом деле при достаточно высоких энергиях имеют единую основу. Любая теоретическая схема объединения взаимодействий привносит в физику новые концепции и влечет нетривиальные экспериментальные предсказания. Именно подтверждение последних в многочисленных опытах ведет к признанию той или иной "объединительной теории".

Возможно ли, что с повышением максимально достижимых энергий ускорителей элементарных частиц ученые обнаружат, что оставшиеся три взаимодействия сводятся к меньшему числу еще более фундаментальных взаимодействий? Теоретики абсолюно уверены в положительном ответе на данный вопрос. Предложен целый ряд сценариев подобного объединения (например, теории великого объединения и суперсимметричные теории). Однако пока нет ясности, на каком масшабе энергий достигается новая стадия объединения и будет ли доступен этот масштаб для эксперименальной проверки в XXI-ом веке. Может возникнуть иной вопрос, а не откроют ли физики новое фундаментальное взаимодействие, принципиально отличное от всех вышеперечисленных? С одной стороны, зксперименты по обнаружению так называемой "пятой силы" (если четырьмя хорошо установленными считать гравитационные, электромагнитные, сильные и слабые силы) ставятся постоянно, но пока ни один из них не привел к положительному результату. С другой - никто не доказал, что "пятая сила" принципиально не может существовать в природе.

На микроскопическом уровне все фундаменальные взаимодействия передаюся при помощи посредников - полей калибровочных бозонов. Бозоны - потому, что ассоциированные с рассматриваемыми полями частицы подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна, то есть имеют целый спин. Переносчик электромагнетизма - фотон () - имеет спин равный единице. Переносчики слабого взаимодействия электрически нейтральный - бозон и электрически заряженные - бозоны, а также переносчики сильного взаимодействия () - глюоны, аналогично фотону имеют спин, равный единице . Эти частицы открыты экспериментально, их свойства хорошо изучены. Считается, что переносчик гравитационного взаимодействия - гравитон - имеет спин, равный двум. Гравитон до сих пор не обнаружен и, скорее всего, не будет обнаружен еще очень долго. Слово "калибровочный" указывает на теоретический прием, используя который, переносчики фундаментальных взаимодействий вводятся в теорию. Даже качественное обсуждение данного приема далеко выходит за рамки предисловия.

Читателя не должен смущать и тот факт, что физики постоянно говорят о полях и частицах как о чем-то взаимозаменяемом, более того, эквивалентном. Действительно, в классических теориях частицы и поля суть совершенно разные физические объекты. Например, электромагнитное поле и альфа-частица. В квантовой теории оба понятия получают естественное обобщение, восходящее к принципу корпускулярно-волнового дуализма Луи де Бройля. Любая микрочастица описывается волновой функцией (или полем), которая, в свою очередь, (вторично) квантуется в терминах операторов рождения и уничтожения квантов этого поля, то есть в терминах рождения и уничтожения частиц. Одним из первых подобный подход в 20-х годах XX-го века был предложен отечественным физиком-теоретиком В.А.Фоком.

У многих студентов младших курсов и у "здравомыслящих" людей, не имеющих дела с микромиром, возникает естественное непонимание, как это может быть, что одна и таже микрочастица в некоторых экспериментальных ситуациях ведет себя подобно волне, а в некоторых - подобно частице? Подсознательно хочется иметь некую наглядную картинку столь странного поведения. Попытаемся нарисовать один из возможных вариантов такой картинки.

Предположим, что жители плоскости хотят описать результаты исследований трехмерного куба, половина граней которого - зеленые, а половина - красные. У плоских ученых в наличии имеются лишь двумерные приборы, а в качестве понятийного аппарата используется двумерная геометрия Евклида. Куб в данном примере играет роль наглядного образа микрочастицы. Куб не зеленый, не красный и не плоский. Он цельный трехмерный объект с шестью гранями разного цвета. Как же могут себе представить куб двумерные ученые? По их мнению, исследуемый объект есть совокупность квадратов, имеющих то странное свойство, что в зависимости от постановки эксперимента квадрат становится то красным, то зеленым, но никогда не красно-зеленым или зелено-красным. На основе своих экспериментов плоские ученые могут создать "квантовую механику" трехмерного цветного куба, которая в качестве существенного элемента будет опираться на принцип "красно-зеленого дуализма". Взаимодействие куба с плоскостью двумерные ученые вполне могут описывать при помощи "волновой функции куба", которая редуцируется после взаимодействия либо к зеленому, либо к красному квадрату. Переходя от кубов и плоскостей к реальным микрочастицам, можно сказать, что любая микрочастица обладает цельным свойством "микрочастичности", для описания которого мы - жители сугубо макроскопического мира - вынуждены неким непротиворечивым образом манипулировать исключительно макроскопическим понятием (других не имеем и не воспринимаем!) плотности вероятности, крайними проявлениями которого в координатном представлении являются макроскопические понятия волны и корпускулы. Очевидно, что представленная наглядная картинка страдает рядом дефектов. Предлагаю читателям самостоятельно придумать более корректный пример.

Помимо калибровочных бозонов существует целый набор фундаментальных фермионов, которые на сегодняшний день считаются элементарными. Это предположение не противоречит совокупности всех экспериментальных данных. Фундаментальные фермионы имеют полуцелый спин, равный одной второй, и делятся на две группы. К первой группе относятся лептоны. Эти частицы не участвуют в сильном взаимодействии. Лептонами являются электрон (), мюон (), тау-лептон () и соответствующие им нейтрино трех типов: электронное нейтрино (), мюонное нейтрино () и тау-лептонное нейтрино ( ). Не вызывает сомнений, что электрон, мюон и тау-лептон имеют массы. Что касается масс нейтрино, то только в 2001 году получены определенные доказательства их существования на Нейтринной обсерватории Садбери (Канада). Вторую группу фундаментальных фермионов образуют кварки. Они участвуют во всех взаимодействиях, включая сильное. Физикам известно шесть типов или, иначе, ароматов кварков: - верхний (up), - нижний (down), - странный (strange), - очаровательный (charm), - прелестный или снова нижний (beauty или bottom) и опять верхний - (top). Кварки перечеслены в порядке возрастания их массы. Рисунок1 в наглядной форме представляет набор базовых частиц Стандартной модели. В настоящее время все экспериментально открытые частицы, отличные от лептонов и калибровочных бозонов, состоят из кварков и глюонов. Эти составные частицы носят название адронов. Наиболее известные адроны - протон и нейтрон. Протон и нейтрон в рамках наивной кварковой модели состоят из и -кварков. Из протона, нейтрона и электрона состоит почти вся материя во Вселенной. Остальные адроны, кварки и лептоны присутствуют в Природе в весьма малых количествах. Физики обычно получают данные частицы на ускорителях, регистрируют в космических лучах или в результате радиоактивных распадов.

Рис. 1. Кварки, лептоны и калибровочные бозоны. Все частицы Стандартной модели, исключая бозон Хиггса. Кварки и лептоны разбиты на три поколения, соответствующие первым трем столбцам на рисунке. Именно так фундаментальные фермионы входят в лагранжиан Стандартной модели.

Особняком в мире фундаментальных частиц стоит бозон Хиггса. Эта частица, по современным теоретическим представлениям, необходима для генерации масс всех кварков, лептонов и трех калибровочных бозонов , и . В некоторых теориях присутствует не одна частица Хиггса, а несколько. В простейшем же случае имеется один электрически нейтральный бозон Хиггса. Бозоны Хиггса экспериментально не обнаружены. Возможно, их вообще не существует в природе. По крайней мере, после неудачных поисков бозона Хиггса на электрон-позитронном коллайдере LEP, подобная гипотеза приобретает все большее и большее число сторонников. Есть надежда, что с вводом в строй коллайдеров нового поколения, таких как протон-протонный коллайдер LHC в CERNе или электрон-позитронный линейный коллайдер TESLA в DESY, бозон Хиггса будет экспериментально открыт или станет понятно, почему он не может существовать. Только надо подождать порядка десяти лет. Есть определенная вероятность, что хиггсовскую частицу смогут открыть на действующем протон-антипротонном коллайдере Tevatron во FNAL-е в ближайшие два-три года.

Таков на сегодняшний день полный набор самых элементарных составляющих нашего мира. Может ли он пополниться? Весьма вероятно. Главным кандидатом является пока еще не открытый бозон Хиггса. Далее, если в природе реализован любой из вариантов объединения трех фундаментальных взаимодействий, то обязаны возникнуть новые фундаментальные калибровочные бозоны. Если же в природе имеется суперсимметрия, то число фундаментальных частиц как минимум удваивается - каждому лептону, кварку и калибровочному бозону необходимо поставить в соответствие частицу-суперпартнера. Отметим, что открытие гипотетической "пятой силы" может пополнить список фундаментальных калибровочных бозонов.

Уверены ли физики, что известный в настоящее время уровень материи наиболее фундаментален, а кварки, лептоны и калибровочные бозоны не являются составными? Нет, не уверены. Существуют теоретические модели, в которых вводятся еще более фундаментальные и элементарные структуры. Например, лептокварки, суперструны или браны. Но ни одна из этих моделей не имеет экспериментального подтверждения. Во всяком случае, в настоящее время не имеет.

Все сказанное выше у неискушенного читателя может вызвать вопрос: "А чего сложного то? Шесть лептонов, шесть кварков, двенадцать (восемь глюонов, фотон, , и ) калибровочных бозонов. Этакую малость изучают более сотни лет многие тысячи людей. Не бесплатно изучают. Современные эксперименты над элементарными частицами обходятся в десятки миллионов долларов ежегодно... каждый. В чем подвох?". Никакого подвоха нет. Дело в том, что при изучении мира элементарных частиц человеку не помогут ни зрение, ни слух, ни обоняние, ни осязание. С другой стороны, любопытствующий человек может исследовать микромир только при помощи макроскопических приборов. Наша физиология не оставляет иного выбора. Но что значит, исследовать микромир при помощи макроприборов? Если призвать на помощь аналогию, то это примерно тоже самое, что играть на бильярде при помощи карьерных экскаваторов. Пока сделаешь один удачный удар, раздавишь несметное число шаров и поломаешь огромное число столов! Современные ускорители и современные детекторы - это "карьерные экскаваторы микроскопического бильярда". Они перелопачивают миллионы событий, закодированных в сотнях миллионов сигналов измерительной аппаратуры, с целью найти всего пять или десять событий, способных дать новую информацию о взаимодействиях элементарных частиц.

Возможно, что аналогия, приведенная в предыдущем абзаце, у склонного к философствованию человека породит еще целый ряд "острых" вопросов к физикам-элементарщикам. Например, а почему физики вообще уверены в реальности существования фундаментальных частиц, в реальности их удивительных квантовых свойств? Вдруг это всего лишь плод нашей фантазии или следствие грубости тех приборов, которыми ученые пытаются изучать столь тонкие вещи как микрочастицы? Более того, возможно физики вообще неправильно понимают микромир и в результате подобного неправильного понимания возникла квантовая теория с ее математическим аппаратом и интерпретациями?

Подобные вопросы ставились перед квантовой механикой и квантовой теорией поля с момента создания. Дать исчерпывающий и окончательный ответ на них не удалось до сих пор. Но часть ответов найдена. Начнем с обсуждения грубости макроскопических приборов. В 30-х годах XX-го века Альберт Эйнштейн предположил, что на самом деле происхождение квантовомеханической вероятности может быть аналогично происхождению вероятности в классической статфизике. Напомним, что в классике вероятностное описание возникает из-за того, что мы в силу некоторых причин отказываемся от полной информации о системе, даваемой точными уравнениями движения, и переходим к распределениям (вероятностей) по неизвестным нам величинам. Эйнштейн предположил, что все микрочастицы в дополнение к их известным характеристикам (массе, спину, зарядам, четностям) обладают набором характеристик, не доступных для измерения любым макроприбором, например, в силу грубости последнего. Эти характеристики назвали скрытыми параметрами квантовой теории. Таким образом, если бы физики могли измерить скрытые параметры, то можно было бы предсказать результат любого взаимодействия в микромире не вероятностным, а абсолютно детерминистичным образом. Более 30-ти лет считалось, что теорию скрытых параметров не возможно ни подтвердить, ни опровергнуть экспериментально. Действительно, как можно измерить то, что нельзя измерить по определению?

Но в 1965 году Дж.Белл отыскал такой способ! Оказалось, что существует целый ряд экспериментальных ситуаций, в которых для определенных линейных комбинаций измеряемых на опыте величин все теории со скрытыми параметрами предсказывают результат, меньший, чем квантовая механика. При этом на возможные скрытые параметры как микрочастицы, так и макроприбора накладывается лишь требование локальности, т.е. совместимости с теорией относительности. Эти линейные комбинации, носящие название неравенств Белла, измерены в нескольких опытах с фотонами и протонами. Результаты опытов полностью совпали с предсказаниями квантовой механики. Исключить нелокальные скрытые параметры экспериментально не возможно. Но, с точки зрения теории, их существование противоречит теории относительности, правильность основных выводов которой подтверждена в сотнях экспериментов на ускорителях, в космических лучах и в атомной промышленности. То есть, любым ниспровергателям сугубо вероятностной квантовой механики придется "в качестве дополнительного упражнения" переформулировать соответствующим образом теорию относительности.

Надо отметить, что в последние десятилетия подобная переформулировка стала представляеться не столь невозможной. Похоже, что в многомерных пространствах возможно выбрать такую метрику, которая, с одной стороны, не нарушает ньютоновский закон гравитации и теорию относительности Эйнштейна в четырехмерии, а с другой - через дополнительные измерения принципиально позволяет передавать сигналы между двумя точками четырехмерного пространства быстрее скорости света. Можно предположить, что с помощью подобных теорий появится возможность построения "причинной квантовой механики" или наоборот, будет поставлен эксперимент, который позволит окончательно опровергнуть любые теории со скрытыми параметрами.

Для восторженных и легковерных читателей особо стоит отметить, что путь, описанный в предыдущем абзаце, лишь ГИПОТЕЗА, которая может оказаться ложной при более пристальном рассмотрении. Кроме того, не все так гладко с выбором метрики. Как ни жаль, но подробное обсуждение данных вопросов далеко выходит за рамки популярного введения в физику элементарных частиц.

Любопытный и, пожалуй, удивительный для неспециалистов факт заключается в том, что предсказания квантовой механики и квантовой теории поля с экспериментальной точки зрения подтверждены гораздо точнее, чем предсказания классической механики и теории относительности. Например, согласие между теоретическими предсказаниями и экспериментальным результатом для аномального магнитного момента электрона составляет 11 знаков после запятой, в то время как характерная точность совпадения теории и эксперимента в классической физике 3-4 знака после запятой.

В заключение скажем несколько слов о реальности элементарных частиц. Действительно, элементарные частицы невозможно ни потрогать, ни понюхать, ни увидеть, ни попробовать на вкус. Информацию об их существовании ученые получают посредством громоздких детекторов, которые выдают для обработки наборы электрических или световых сигналов. Только специальным образом анализируя полученные сигналы, физики могут изучать свойства элементарных частиц. На первый взгляд, нет абсолютно никакой гарантии, что в длинной цепочке передачи сигнала из микромира к макроскопическому наблюдателю физики-экспериметаторы правильно учитывают помехи, ошибки или искажения первичной информации. Следовательно, элементарные частицы могут оказаться лишь мороком, неправильной интерпретацией искаженных сигналов. Иное дело - макроскопические объекты. Человек может узнать характеристики макроскопических объектов без всяких посредников, только при помощи органов чувств. Поэтому в реальности макроскопического окружающего мира, как правило, не сомневается. Но так кажется только на первый весьма повехностный взгляд.

Работа ЛЮБОГО органа чувств человека в макромире принципиально не отличима от работы макроприбора для изучения микромира. В качестве примера рассмотрим зрение. Пусть человек видит стол. Что происходит на самом деле? Солнце испускает огромное число фотонов. Они взаимодействуют с атомами стола, переизлучаются во все стороны и малая их часть попадает в глаз. Хрусталик глаза, в свою очередь, фокусирует фотоны на сетчатке, где в результате химической реакции с палочками и колбочками возникают электрические сигналы. Эти сигналы по нервным волокнам передаются в мозг, который путем сложного анализа поступившей информации воспроизводит изображение стола. Естественно, что реальность зрительного восприятия можно проверить при помощи иных органов чувств, например, попробовать укусить стол зубами или ударить по нему кулаком. В результате подобных действий в мозг уйдет независимый сигнал от зубов или рук, подтверждающий сигнал от глаз. Но, аналогично рассмотреному выше примеру, реальность элементарных частиц, универсальность их свойств подтверждается множеством детекторов принципиально различных конструкций (камеры Вильсона, счетчики Гейгера во всех модификациях, пропорциональные камеры, черенковские счетчики, ионизационные калориметры десятков различных систем). Этот набор макроприборов гораздо богаче, чем пять человеческих чувств! А результаты независимых измерений характеристик микрочастиц, выполненных этими приборами, прекрасно согласуются друг с другом. Именно поэтому физики считают, что, скажем, -бозон, полученный на электрон-позитронном коллайдере в CERNе, не менее реален, чем стол или табурет в вашей квартире, а кварк внутри протона такой же элемент Вселенной, как и президент США, хотя ни первого, ни второго среднестатистический (российский) ученый живьем не видел.

Правда, всегда можно удариться в солипсизм. Против лома солипсизма нет сугубо научного приема. Сторонникам солипсизма остается только посоветовать перестать представлять, что они читают данную нудную статью, и заняться чем-нибудь более приятным. Читателям, всерьез заинтересовавшимся обсуждаемыми выше вопросами, для более глубокого изучения можно порекомендовать книги [ 1]-[ 5].

На этом краткое популярное введение в физику микромира можно закончить и перейти непосредственно к книге Дональда Перкинса.

Одинадцать лет назад "Энергоатомиздат" выпустил перевод третьего английского издания прекрасной книги британского ученого, профессора физики Оксфордского университета Дональда Перкинса "Введение в физику высоких энергий" (тираж 3000 экз). Книга поистине уникальная. Во-первых, в сравнительно небольшом объеме последовательно и весьма подробно изложены результаты всех ключевых экспериментов в физике микромира и четко показано, как каждый из этих экспериментов повлиял на становление теории элементарных частиц. Во-вторых, не может не поражать уровень изложения. Книга может быть полезна и третьекурснику, только начинающему в рамках курса общей физики изучать элементарные частицы, и старшекурснику, и аспиранту и даже сложившемуся ученому, желающему четко, ясно, быстро и глубоко уяснить себе конкретный вопрос в физике микромира. Много интересных методических находок найдут у Д.Перкинса популяризаторы науки. Мне не известно ни одной столь же универсальной книги!

Однако с момента выхода английского издания (1987 год) прошло порядочное время. Физика элементарных частиц шагнула далеко вперед. И вот в 2000-ом году издательство "Cambridge University Press" выпустило в свет четвертое переработанное и дополненное издание "Введения ...". Спустя два года книга в России не переведена, хотя ситуация с выпуском научной литературы за последние три года у нас в стране весьма улучшилась.

Предлагаю сетевым читателям перевод одного параграфа из нового издания "Введения...". В этом параграфе рассказывается об открытии последнего и самого тяжелого из кварков -кварка. Из данного параграфа читатель не физик сможет до некоторой степени понять экспериментальные трудности и методы их обхода, характерные для современной физики элементарных частиц. Открытие -кварка произошло относительно недавно - в 1995 году. На русском языке пока нет ни одного глубокого, но в тоже время и достаточно популярного изложения этого крупного достижения физики частиц.

Переведенный параграф предназначен прежде всего для студентов физичиских специальностей ВУЗов, но может оказаться полезным читателям, интересующимся фундаментальными научными открытиями. В последнем русском издании книги Д.Перкинса переведенный материал должен соответствовать параграфу 5.16.

Данная статья является составной частью сетевого проекта "Студентам о новейших достижениях в физике элементарных частиц" [ 6]. В 2001 году в рамках данного проекта была опубликована заметка Г.Фрейзера "Мелодрама под названием "Время искать Хиггс" [ 7] об интригующих, но, увы, безрезультатных поисках бозона Хиггса на электрон-позитронном коллайдере LEP в CERN-e.

В заключение необходимо отметить, что приведенные в русском издании 1991 года предварительные экспериментальные данные CERN-а по успешному поиску -кварка в распаде и измерению 40 ГэВ не подтвердились. В настоящее время масса самого тяжелого кварка считается равной ГэВ, поэтому -кварк не может быть продуктом распада -бозона. Наоборот, -бозон является одним из продуктов распада -кварка.