

23 Материя, из которой мы состоим

Квантовая теория поля — невероятно мощный научный аппарат. Если бы можно было себе представить, что каркас какой-либо физической теории мог бы родиться от союза Годзиллы и Халка, то речь шла бы именно о квантовой теории поля.

«Мощный» не означает «стирающий в пыль целые города». (Хотя квантовая теория поля именно такова, поскольку лишь она позволяет описать, как одна частица превращается в другую, а такой процесс — важнейший аспект ядерных реакций и, следовательно, атомного оружия.) В контексте научных теорий «мощная» на самом деле означает «строгая» — согласно по-настоящему мощной теории, многие вещи просто не могут произойти. Сила, о которой мы здесь говорим, — это возможность начать с минимального числа посылок и прийти к таким выводам, которые будут надежны и широко применимы. Квантовая теория поля не сносит здания, попадающиеся ей на пути; она крушит наши спекуляции о том, какие явления возможны в физической реальности.

Сейчас мы сделаем очень дерзкое заявление.

Заявление: физические законы, лежащие в основе повседневной реальности, полностью известны.

Подобное заявление сразу вызывает изрядный скепсис. Оно нахальное, самодовольное, причем кажется, что вполне реально можно себе представить, в каких отношениях наша картина мира может оказаться удручающе неполной. Такое заявление до боли напоминает

многочисленные исторические примеры, когда тот или иной великий мыслитель хвастал, что путь к исчерпывающим знаниям близится к концу. Всякий раз такие заявления оказывались смехотворно преждевременными.

Однако мы утверждаем, что нам известны не все законы физики, а лишь их ограниченное множество, достаточное для описания всего, что происходит в нашей повседневной жизни. Даже такая формулировка кажется весьма самонадеянной. Наверняка должны существовать многочисленные возможности добавлять в Базовую теорию новые частицы и взаимодействия, которые могут оказаться важны для обыденной физики, и, если уж на то пошло, открывать совершенно новые явления, полностью выходящие за рамки квантовой теории поля. Верно?

Нет. Ситуация теперь на самом деле иная, нежели все, что было когда-либо в истории науки. Мало того, что у нас есть успешная теория, мы к тому же знаем, как далеко может распространиться эта теория, прежде чем в ней можно будет усомниться. Да, просто квантовая теория поля настолько мощная.

* * *

В основе нашего дерзкого заявления лежит простая логика.

1. Все, что мы знаем, свидетельствует о том, что квантовая теория поля — адекватный аппарат, позволяющий описывать физику повседневности.
2. Законы квантовой теории поля подразумевают, что уже не могут быть открыты никакие новые частицы, силы или взаимодействия, которые были бы существенны для нашей повседневной жизни. Мы уже открыли их все.

Может ли квантовая теория поля где-нибудь не сработать? Разумеется. Как хорошие байесовцы, мы вполне усвоили, что лучше не обнулять субъективную вероятность даже в самых крайних случаях. В частности, квантовая теория поля, возможно, не в состоянии полностью описать человеческое поведение, поскольку физика может быть для этого непригодна. Может случиться чудесное вмешательство либо какой-нибудь исходно нефизический феномен, влияющий на свойства физической материи. Никакой научный прогресс никогда полностью не исключит такую возможность. Но мы можем

показать, что физика как таковая абсолютно достаточна для описания всего, что мы видим.

Специальная теория относительности Эйнштейна (в отличие от общей теории относительности) объединяет пространство и время в одно целое и постулирует, что скорость света является абсолютным пределом скорости во Вселенной. Допустим, мы хотим сформулировать теорию, которая одновременно охватывала бы три эти идеи:

- 1) квантовая механика,
- 2) специальная теория относительности,
- 3) значительно удаленные регионы пространства функционируют независимо друг от друга.

Нобелевский лауреат Стивен Вайнберг утверждает, что любая теория, соответствующая этим требованиям, будет *напоминать* квантовую теорию поля на (относительно) больших расстояниях и при низких энергиях — допустим, больше протона. Независимо от того, что происходит на конечном, самом фундаментальном и исчерпывающем уровне природы, тот мир, который доступен для человеческого наблюдения, будет хорошо описываться квантовой теорией поля.

Следовательно, если мы хотим описать окружающий нас повседневный мир низких энергий, строго придерживаясь физических законов, то должны действовать в контексте квантовой теории поля.

* * *

Давайте признаем, что квантовая теория поля работает в повседневных условиях, и зададимся вопросом, почему больше не может существовать неоткрытых частиц, которые как-либо влияли бы на окружающий мир.

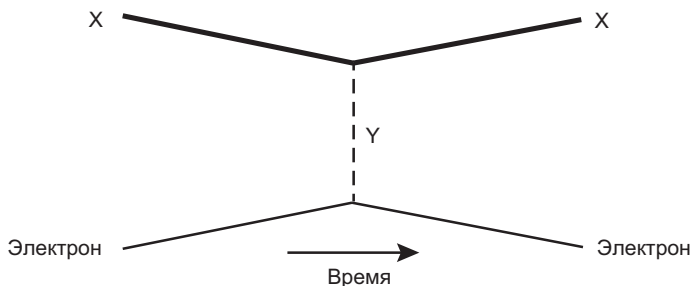
Во-первых, нужно удостовериться, что не может существовать реальных материальных частиц, которые бы носились вокруг и пронизывали наше тело, как-либо влияя при этом на поведение уже известных нам частиц. Затем нужно убедиться, что на свете нет никаких *виртуальных* частиц или новых взаимодействий, которые с определенной вероятностью могли бы влиять на те частицы, которые мы наблюдаем. В квантовой теории поля виртуальными именуются такие частицы, которые молниеносно возникают и столь же быстро исчезают, образуя квантовые флуктуации и влияя при этом на реальные частицы, но сами остаются совершенно незаметными. Эту проблему

мы рассмотрим в следующей главе, а пока давайте сосредоточимся на реальных частицах.

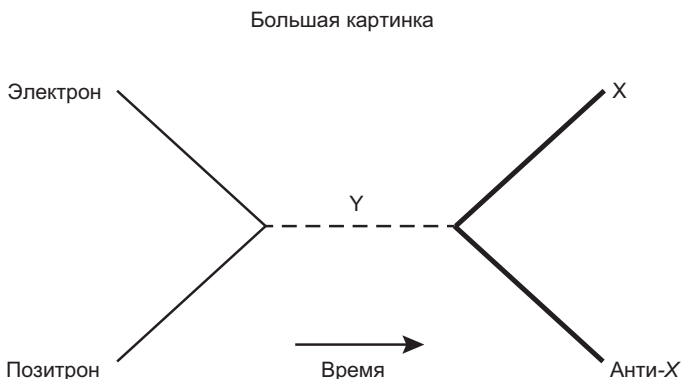
Нам известно, что в физике не существует никаких новых частиц и полей, которые играли бы важную роль в повседневной жизни; это связано с ключевым свойством квантовой теории поля, так называемой *перекрестной симметрией*. Это удивительное явление помогает убедиться в том, что некоторых разновидностей частиц не существует, иначе мы бы их уже нашли. В принципе перекрестная симметрия заключается в следующем: если одно поле может взаимодействовать с другим (например, рассеиваться при контакте с ним), то второе поле при подходящих условиях может *порождать* частицы первого. Можно сказать, что на уровне квантовой теории поля этот принцип аналогичен закону «на всякое действие есть противодействие».

Рассмотрим новую частицу X , которая, как мы можем полагать, вызывает малозаметные, но важные эффекты в повседневном мире — например, позволяет гнуть ложки силой мысли или является источником сознания как такового. В таком случае частица X должна прямо или косвенно взаимодействовать с обычными частицами, например с кварками и электронами. Если этого не происходит, то она никоим образом не может оказывать влияния на тот мир, который мы непосредственно наблюдаем.

Взаимодействия между частицами в квантовой теории поля визуализируются при помощи прелестных картинок, которые называются *диаграммами Фейнмана*. Допустим, частица X отскакивает от электрона, при этом обмениваясь с ним какой-то новой частицей Y . Слева направо на диаграмме показано следующее: появляются X и электрон, обмениваются частицей Y и разлетаются своими дорогами.



На диаграмме изображено не то, что может произойти: диаграмме соответствует число, сообщающее, насколько сильным является это взаимодействие — в данном случае, с какой вероятностью X отскочит от электрона. Согласно перекрестной симметрии, каждому такому явлению соответствует другой процесс такой же силы, который можно изобразить, повернув диаграмму на 90 градусов, а во всех линиях, направление которых изменилось, заменить частицу на античастицу. Пример результата перекрестной симметрии показан на следующем рисунке.



На диаграмме изображена аннигиляция электрона и позитрона (античастицы, соответствующей электрону) с образованием частицы Y , которая затем распадается на X и анти- X .

Эта диаграмма связана с предыдущей по принципу перекрестной симметрии

В теории поля каждой частице соответствует своя античастица, имеющая противоположный электрический заряд. Античастица электрона называется «позитрон», она имеет положительный заряд. Согласно перекрестной симметрии, первое явление, отскок частицы X от электрона, подразумевает, что есть и аналогичное явление, при котором электрон аннигилирует с позитроном и в результате порождается наша частица X , а также ее античастица.

И вот что получилось в итоге. Мы экспериментировали со столкновениями электронов и позитронов, ставили такие опыты часто и тщательно. С 1989 по 2000 год для этой цели в подземной лаборатории близ Женевы использовался Большой электрон-позитронный коллайдер (предшественник современного Большого адронного

коллайдера). В ходе этих экспериментов электроны и позитроны сталкивались при немислимых энергиях, а физики внимательно отслеживали все, что возникало в итоге. При этом они всем сердцем надеялись найти новые частицы; открытие новых частиц, в особенности неожиданных, — самая захватывающая сторона этой области физики. Но они не встретили ничего нового. Лишь известные частицы из Базовой теории, возникавшие в огромных количествах.

* * *

То же самое было проделано и для столкновений протонов с антипротонами, пробовали и разнообразные иные комбинации. Вердикт однозначен: мы открыли все элементарные частицы, которые только позволяют обнаружить наши самые ультрасовременные технологии. Перекрестная симметрия не оставляет сомнений в том, что если бы от нас ускользали еще какие-то частицы, взаимодействующие с обычной материей достаточно сильно, чтобы это сказывалось на обычной материи, то такие частицы должны были бы легко возникать при экспериментах. Но ничего такого не происходит.

Вероятно, нам еще предстоит найти новые элементарные частицы. Просто они никак не влияют на обыденный мир. Тот факт, что мы еще не нашли таких частиц, сам по себе многое сообщает о том, какие свойства у них должны быть; в этом сила квантовой теории поля. Любая частица, которую мы пока не нашли, должна обладать одним из следующих признаков:

- 1) она должна так слабо взаимодействовать с обычной материей, что такие частицы почти никогда не образуются, или
- 2) она может быть крайне массивной, поэтому может образоваться лишь при столкновениях столь высоких энергий, которые пока недостижимы даже в наших лучших ускорителях, или
- 3) она может быть исключительно короткоживущей, настолько, что, едва образовавшись, сразу распадается на другие частицы.

Если бы какая-то из необнаруженных нами частиц существовала достаточно долго и взаимодействовала с обычной материей настолько сильно, что это могло бы отражаться на физических явлениях окружающего мира, то мы бы уже получили ее в экспериментах.

Считается, что еще одна разновидность пока не открытых частиц может существовать, и именно из этих частиц состоит темная материя.

Астрономы, изучающие движения звезд и галактик, а также крупномасштабную структуру Вселенной, убедились, что большая часть материи является «темной», то есть состоит из каких-то новых частиц, не относящихся к Базовой теории. Частицы темной материи должны быть достаточно долговечны, иначе они давным-давно бы распались. Но они не могут достаточно сильно взаимодействовать с обычной материей, так как в противном случае уже давно были бы открыты в одном из многих экспериментов, призванных обнаружить темную материю, — физики ведут такие опыты прямо в наши дни. Чем бы ни являлась темная материя, она определенно не делает погоды здесь, на Земле, — никак не связана ни с биологией, ни с сознанием, ни с человеческой жизнью.

* * *

В этом анализе есть очевидный изъян. Есть частица, которая, на наш взгляд, должна существовать, но которую пока так и не удалось обнаружить: это гравитон. Он легок и достаточно стабилен, чтобы возникнуть, но гравитация — настолько слабое взаимодействие, что все гравитоны, которые мы могли бы получить в ускорителе частиц, сразу будут поглощены множеством иных образующихся там частиц. Однако гравитация влияет на нашу повседневную жизнь.

Основная причина, по которой гравитация так важна, заключается в следующем. Это дальнodelствующая сила, которая накапливается: чем больше у нас вещества, оказывающего гравитационное воздействие, тем сильнее это воздействие. (Такая закономерность может не соблюдаться, скажем, для электромагнетизма, так как положительные и отрицательные заряды обнуляются, а гравитация всегда только усиливается.) Итак, хотя и нет надежды синтезировать или зафиксировать отдельный гравитон при столкновении двух частиц, общее гравитационное воздействие всей Земли дает существенную силу тяготения.

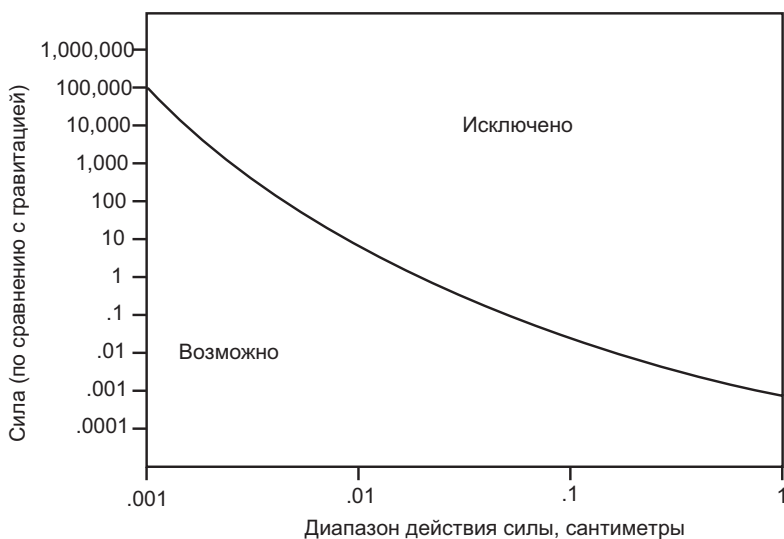
Возможно, этой лазейкой «пользуется» и какая-то другая сила: при рассмотрении всего нескольких частиц она может быть несущественной, но вдруг она накапливается, если собрать вместе достаточно много материи? Физики уже много лет ищут такое «пятое взаимодействие». Пока ничего не нашли.

Поиск новых взаимодействий значительно упрощается благодаря тому, что обычные объекты состоят всего из трех видов частиц:

протонов, нейтронов и электронов. Еще одна черта квантовой теории поля заключается в том, что она не позволяет «включать» и «выключать» воздействия отдельных частиц; соответствующие им поля никуда не деваются. Можно генерировать макроскопические силы, правильно комбинируя положительные и отрицательные заряды, например в электромагните, но поля частиц всегда присутствуют. Итак, нужно искать взаимодействия между частицами этих трех видов. Физики именно этим и занимаются: ставят безукоризненно точные эксперименты, при которых тела разного состава сначала сближаются друг с другом, а затем вновь удаляются; при этом ищут любой намек на какое-либо влияние, не связанное с известными силами природы.

Результаты, полученные по состоянию на 2015 год, схематически представлены на следующем рисунке. Любые возможные взаимодей-

МАТЕРИАЛ, ИЗ КОТОРОГО МЫ СДЕЛАНЫ



Эксперименты показывают, что силы, которые могли бы действовать на обычную материю, подчиняются примерно таким ограничениям. Если какое-то взаимодействие пока не удалось выявить, то оно либо должно быть совсем слабым, либо действовать на очень небольшом расстоянии

ствия между двумя заданными видами частиц имеют два числовых параметра: сила этого взаимодействия и расстояние, на котором оно ощущается. (Гравитация и электромагнетизм являются «дальнодействующими» силами, простирающимися фактически на бесконечные расстояния; зона влияния слабых и сильных ядерных взаимодействий очень мала — меньше размера атома.) Проще измерять сильные и при этом дальнодействующие силы. Существование подобных неоткрытых взаимодействий мы уже исключили.

Таким образом, если диапазон действия новой силы составляет более одной десятой доли сантиметра — что было бы необходимым условием, если бы она позволяла гнуть ложки или была тем механизмом, который позволяет Сатурну влиять на вас в момент вашего рождения, — то была бы значительно слабее гравитации. На первый взгляд кажется, «не так уж и слабо», но не забывайте, что сила гравитации исчезающе мала. Всякий раз, когда вы подпрыгиваете, крошечные электромагнитные силы вашего тела позволяют ненадолго преодолеть суммарную гравитацию всей Земли. Столь слабое взаимодействие, как гравитация, — это сила, составляющая одну миллиардную миллиардной миллиардной от силы электромагнетизма. Еще более слабое взаимодействие должно быть полностью пренебрежимо в повседневных условиях.

Здесь, в повседневной реальности, в мире людей, домов и машин, мы полностью каталогизировали все частицы, силы и взаимодействия, которые способны оказывать заметный эффект на что бы то ни было. Это колоссальное интеллектуальное достижение, которым человеческий род может по праву гордиться.