

Стивен Вайнберг⁵¹. Единая физика к 2050 году?

Одна из главных задач физики – постигать замечательное разнообразие природы единым способом. Самые большие научные достижения прошлого были шагами к этой цели: объединение земной и небесной механики Исааком Ньютоном в 17 столетии; оптики с теорией электричества и магнетизма Джеймсом Клерком Максвеллом в 19 столетии; геометрии пространства-времени и гравитации Альбертом Эйнштейном с 1905 по 1916 год; а также химии и атомной физики в квантовой механике в 20-ых годах.

Эйнштейн посвятил последние 30 лет своей жизни неудачному поиску «единой теории поля», которая объединила бы общую теорию относительности (его собственную теорию пространства-времени и гравитации) с теорией электромагнетизма Максвелла. Продвижение к объединению было сделано позже, но в другом направлении. Наша теперешняя теория элементарных частиц и сил, известная как Стандартная Модель физики элементарных частиц, достигла объединения электромагнетизма со слабыми взаимодействиями, сил, управляющих взаимодействием нейтронов и протонов в радиоактивных процессах и в недрах звезд. Стандартная Модель дает отдельное, но похожее описание сильного взаимодействия, удерживающего кварки внутри протонов и нейтронов, а протоны и нейтроны вместе внутри атомных ядер.

У нас есть идеи относительно того, как теория сильных взаимодействий может быть объединена с теорией слабых и электромагнитных взаимодействий (такое объединение часто называется Великим Объединением, но они могут сработать только если подключить гравитацию, что само по себе является тяжелой задачей. Мы подозреваем, что очевидные различия этих сил обусловлены некими событиями на самой ранней стадии Большого Взрыва, а исследование деталей столь ранней космической истории, возможно, потребует более подходящей теории гравитации и других сил. Существует шанс завершить работу над Великим Объединением к 2050, но мы вряд ли можем говорить об этом уверенно.



Рис. 1. В объединенной теории приходится иметь дело с *квантовым характером* пространства и времени. В области сверхмалых расстояний, пространство может быть представлено непрерывной структурой соединяющихся между собой струн и мембран, или чем-либо другим, до сего времени еще неизвестным.

Квантовые поля

Стандартная Модель есть квантово-полевая теория. Основные объекты такой теории – поля, включая электрические и магнитные поля электродинамики 19-го века. Колебания таких полей переносят энергию и импульс с одного места пространства в другое, а квантовая механика утверждает, что эти волны собираются в пакеты, или кванты, которые наблюдаются в лаборатории как элементарные частицы. В частности, квант электромагнитного поля – частица, известная как фотон. Стандартная Модель включает в себя поля для каждого типа элементарных частиц, наблюдаемых в лабораториях физики высоких энергий. Имеются лептонные поля, кванты которых представляют собой знакомые нам электроны, составляющие внешние оболочки обычных атомов, более тяжелые частицы, известные как мю-мезоны и тау-мезоны, а также

⁵¹ Написано в 1999 г.; <http://sceptic-ratio.narod.ru/po/kn5.htm#kn5a>.

соответствующие им электрически нейтральные частицы, известные как нейтрино. Имеются также поля для кварков различных типов, некоторые из которых связаны вместе внутри протонов и нейтронов, составляющих ядра обычных атомов. Силы между этими частицами обусловлены процессами обмена фотонами и частицами W^+ , W^- и Z^0 , передающих слабые взаимодействия, а также восьмью типами глюонов, ответственных за сильное взаимодействие.

Эти частицы демонстрируют нам широкое разнообразие масс, в котором скрыта еще не познанная нами закономерность, где электрон 350 000 раз легче, чем самый тяжелый кварк, а нейтрино еще легче, чем электрон. Стандартная Модель не предоставляет нам механизма, позволяющего рассчитать любую из этих масс, пока мы не введем в нее дополнительные скалярные поля. Слово «скаляр» означает, что эти поля не чувствительны к направлению в пространстве, в отличие от электрических, магнитных и других полей Стандартной Модели. Это открывает возможность таким полям заполнять всё пространство, не противореча одному из наиболее доказанных принципов физики, согласно которому все пространственные направления одинаково хороши. (Напротив, если бы, например, имелось ненулевое магнитное поле всюду в пространстве, то мы могли идентифицировать привилегированное направление, используя обычный компас.) Взаимодействие других полей Стандартной Модели со всепроникающими скалярными полями, как полагают, дает массы частицам Стандартной Модели.

Объединение

Таблица 1. Объединение разнородных явлений в одной теории уже долгое время является центральной темой физики. Стандартная Модель физики частиц успешно описывает три (электромагнетизм, слабые и сильные взаимодействия) из четырех известных науке сил, но впереди еще окончательное объединение с общей теорией относительности, которая описывает гравитацию и природу пространства и времени.

электричество	электромагнетизм	электрослабое взаимодействие	Стандартная Модель	?
магнетизм				
свет				
бета распад	слабое взаимодействие			
нейтрино				
протоны	сильное взаимодействие			
нейтроны				
пионы				
земное притяжение	универсальная гравитация	Общая Теория Относительности		
небесная механика				
	геометрия пространства-времени			

За вершиной

Чтобы завершить Стандартную Модель мы должны подтвердить существование этих скалярных полей и выяснить, сколько существует их типов. Это – проблема обнаружения новых элементарных частиц, часто называемых частицами Хиггса (Higgs particles), которые могут быть зарегистрированы как кванты этих полей. Мы имеем достаточно оснований ожидать, что эта задача будет выполнена к 2020 году, поскольку ускоритель, называемый Большим Адронным Коллайдером (Large Hadron Collider) Европейской лаборатории физики элементарных частиц близ Женевы (CERN) будет работать для этого более десяти лет.⁵²

⁵² Одна из этих частиц – бозон Хиггса – была наконец обнаружена в 2012 г. См. об этом статью В.А. Рубакова в этом номере Бюллетеня (*прим. Редколлегии*).

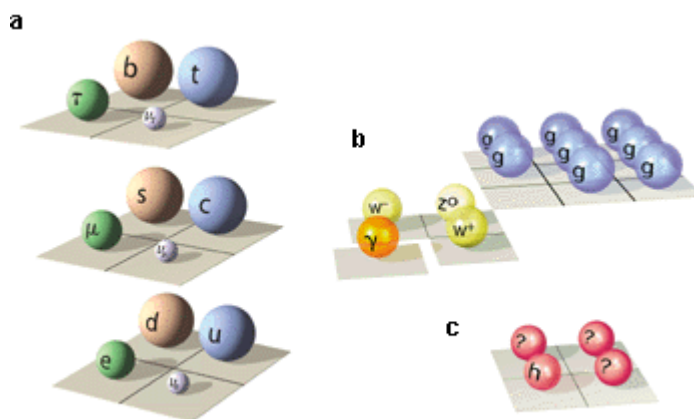


Рис. 2. Стандартная Модель физики элементарных частиц описывает каждую частицу материи и каждую силу как квантовые поля. Элементарные частицы материи – три поколения фермионов (а). Каждое поколение этих частиц имеет сходную структуру свойств. Фундаментальные взаимодействия переносятся бозонами (b), которые организованы согласно трем близко родственным симметриям. Кроме того, одна или большее количество частиц или полей Хиггса (с) порождают массы других полей.

Главные достижения

Таблица 2. Главные достижения фундаментальной физики сближаются, когда принципы различных теорий приводятся в соответствие в рамках новой единой структуры. Нам пока еще не известен принцип, лежащий в основе объединения квантовой теории поля (в форме Стандартной Модели) с общей теорией относительности.

Квантовая Механика: корпускулярно-волновой дуализм, суперпозиция, вероятность	Квантовая Теория Поля: виртуальные частицы, перенормировка	?
Специальная Теория Относительности: геометрия пространства-времени, относительность движения	Общая Теория Относительности: принцип эквивалентности, динамика пространства-времени	
Ньютоновская Механика: универсальная гравитация, сила и ускорение		

По меньшей мере, должна быть обнаружена единственная электрически нейтральная скалярная частица. Будет катастрофой, если всё, что обнаружится к 2020 году, тем не менее, так и оставит нас без ключа к решению огромной загадки характерных энергий, с которыми сталкиваются в физике (известной как проблема иерархии).

Самая тяжелая из известных частиц Стандартной Модели – верхний кварк (top quark), с массовым эквивалентом в 175 ГэВ. (Один ГэВ – немного больше чем энергия, содержащаяся в протонной массе). Еще не обнаруженные частицы Хиггса,⁵³ как ожидается, будут иметь подобные массы, от 100 до нескольких сотен ГэВ. Но имеется основание считать, что шкала масс, которые будут появляться в уравнениях еще не сформулированной объединенной теории, будет намного большей. В Стандартной Модели взаимодействия полей глюонов, W-бозонов, Z-бозонов и фотонов с другими полями этой модели имеют различную интенсивность; именно поэтому силы, произведенные обменом глюонами – приблизительно 100 раз больше, чем другие при обычных условиях. Гравитация – значительно более слабое взаимодействие: величина силы тяготения между электроном и протоном в атоме водорода – составляет приблизительно 10^{-39} от величины электрической силы.

⁵³ См. прим. ред.

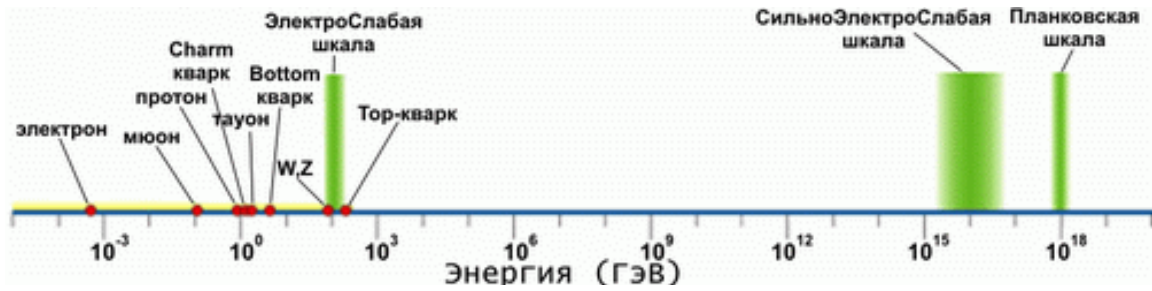


Рис. 3. Проблема иерархии – мера нашего незнания. В экспериментах (желтая зона), имеющих дело с энергиями приблизительно до 200 ГэВ регистрируется целый ассортимент масс частицы (красные точки) и шкал энергии взаимодействия (зеленые полосы), которые весьма хорошо описаны Стандартной Моделью. Загадкой для нас является обширный промежуток между двумя дальнейшим энергетическим шкалами, а именно сильно-электрослабого объединения (10^{16} ГэВ) и планковской шкалы, характерной для квантовой гравитации (10^{18} ГэВ).

Но все эти силы взаимодействия зависят от энергии, при которой они измерены [см. илл. «Силы Связи», рис. 5]. Поразительно, что, когда взаимодействия полей Стандартной Модели экстраполируются в область высоких энергий, они все становятся равными друг другу при энергиях немного больше, чем 10^{16} ГэВ, и сила гравитации имеет ту же самую величину при энергиях не намного выше, чем 10^{18} ГэВ. (Предложенные уточнения в теории гравитации показывают, что величина силы гравитации может сравняться с другими силами уже при 10^{16} ГэВ.) Мы привыкли к довольно большим массовым отношениям в физике элементарных частиц, примерно от 1 до 350 000 раз в отношении массы высшего кварка к электронной массе, но это ничто по сравнению с огромным отношением фундаментальной шкалы энергии Великого Объединения 10^{16} ГэВ (или возможно 10^{18} ГэВ) к энергетической шкале приблизительно 100 ГэВ, типичной для Стандартной Модели. Основная задача проблемы иерархии – объяснить это огромное соотношение, этот гигантский скачок от одного уровня до следующего в последовательности энергетических шкал, причем это отношение должно быть не результатом подгонки констант в наших уравнениях, а естественным следствием фундаментальных принципов.

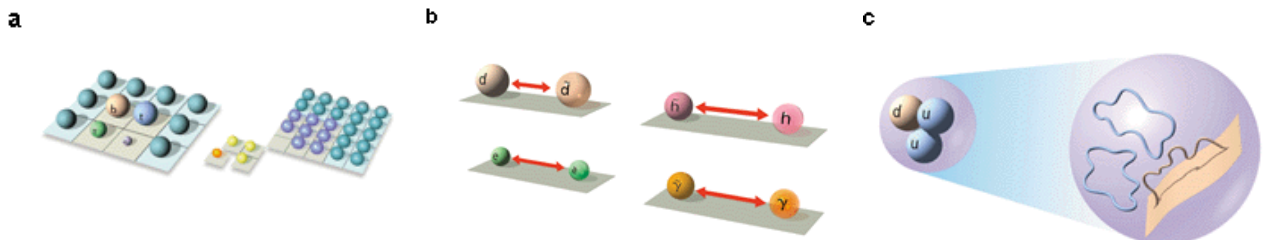


Рис. 4. Имеется несколько путей объединения физики, находящейся вне Стандартной Модели. Модели техникolorа (а) представляют новые взаимодействия, аналогичные «цветной» силе, которая связывает кварки. Как следствие этого – появление новых поколений частиц, отличающихся от трех известных. Суперсимметрия (b), связывающая фермионы с бозонами, добавляет к каждой известной частице суперсимметричного партнера. М-теория и теория струн (с) видоизменяют полную модель в терминах новых объектов типа крошечных струн, петель и мембран, которые ведут себя подобно частицам при низких энергиях.

Теоретики предложили несколько интересных идей для естественного решения проблемы иерархии, включая новый принцип симметрии, известный как суперсимметрия (который также улучшает точность, с которой силы взаимодействий сближаются при 10^{16} ГэВ), или новое сильное взаимодействие, известное как техникolor (technicolor). Все эти теории содержат дополнительные силы, которые объединены с сильными, слабыми и электромагнитными силами при энергиях приблизительно 10^{16} ГэВ. Новые взаимодействия становятся преобладающими при энергиях намного ниже 10^{16} ГэВ, но мы не можем наблюдать их непосредственно, так как они не действуют на известные частицы Стандартной Модели. Вместо этого они действуют на другие частицы, которые являются слишком массивными, чтобы они могли быть получены в наших лабораториях. Эти «очень тяжелые» частицы – тем не менее, намного легче, чем 10^{16} ГэВ, потому что они приобретают свою массу из энергии нового взаимодействия, которое является сильным только далеко ниже 10^{16} ГэВ. В этой картине известные частицы Стандартной Модели

взаимодействовали бы с самыми тяжелыми частицами, и их массы возникнут как вторичный эффект этого относительно слабого взаимодействия. Этот механизм решил бы проблему иерархии, делая известные частицы легче, чем самые тяжелые частицы, которые сами намного легче, чем 10^{16} ГэВ.

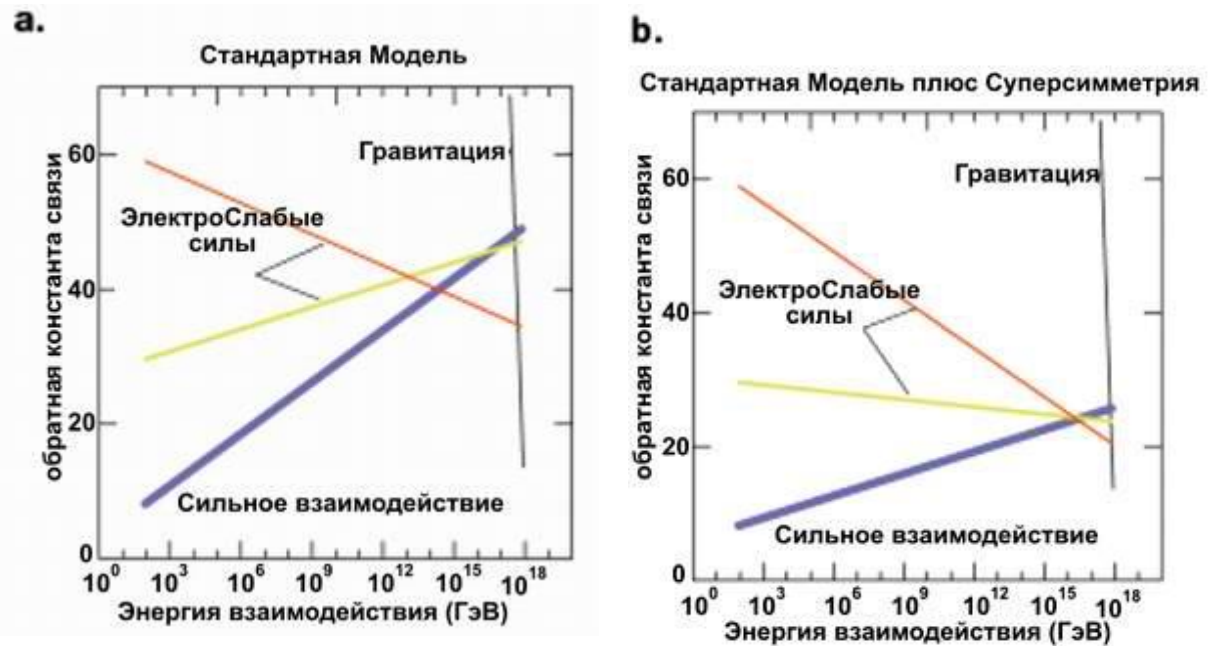


Рис. 5. Константы связи взаимодействий не остаются постоянными, а медленно изменяются в зависимости от энергии; этот процесс точно описан квантовой теорией поля и проверен экспериментом вплоть до 200 ГэВ. Теоретическая экстраполяция показывает, что три взаимодействия Стандартной Модели (сильное и объединенные слабое и электромагнитное) имеют приблизительно равную интенсивность при очень высоких энергиях (а), а при учете суперсимметрии (б) это равенство становится еще более точным. Толщина кривой указывает приблизительную неопределенность в константах связи.

Все эти идеи имеют общую черту: они требуют существования зоопарка новых частиц с массами не намного больше чем 1000 ГэВ. Если в этих идеях есть доля истины, то эти частицы должны быть обнаружены к 2020 в Большом Адронном Коллайдере, а некоторые из них можно обнаружить даже раньше в Fermilab или CERN, хотя и не исключено, что для этого может понадобиться больше чем десятилетие и новые ускорители, чтобы исследовать их свойства полностью. Когда эти частицы будут обнаружены и их свойства измерены, мы будем способны узнать, пережила ли какая-либо из них ранние моменты Большого Взрыва, чтобы теперь стать «темной материей» (dark matter) в межгалактическом пространстве, которая, как считается, составляет основную часть существующей массы вселенной. Во всяком случае, кажется вероятным, что к 2050 мы поймем, в чем причина такого огромного отношения энергетических шкал.

Подавленные взаимодействия

Что же будет дальше? Не имеется фактически никакого шанса, что мы будем способны ставить эксперименты, в которых изучались бы процессы при энергиях частиц 10^{16} ГэВ. В существующих технологиях диаметр ускорителя пропорционален энергии, сообщенной ускоренным частицам. Для разгона частицы до энергии 10^{16} ГэВ потребовался бы ускоритель диаметром в несколько световых лет. Даже если кто-нибудь и нашел другой способ концентрировать такое большое количество энергии на отдельной частице, то будет очень трудно извлечь полезную информацию из наблюдения над процессами при таких энергиях. Но даже при том, что мы не можем изучать процессы при энергиях порядка 10^{16} ГэВ непосредственно, имеется очень хороший шанс, что эти процессы производят эффекты и при доступных энергиях, которые могут быть зафиксированы экспериментально, потому что они не выходят за рамки дозволенного Стандартной Моделью.

Стандартная Модель – квантовая теория поля специального вида, а именно «перенормируемая» теория. Этот термин отсылает нас назад к 40-ым годам, когда физики учились, как

использовать первые квантово-полевые теории для вычисления тонкой структуры атомных уровней. Они нашли, что вычисления, использующие квантовую теорию поля, дают бесконечные величины; такая ситуация обычно означает, что теория либо ужасно испорчена, либо находится вне пределов своей применимости. Но они вовремя нашли способ обращения с бесконечными величинами, включая их при помощи переопределения или «перенормировки» (renormalization) в некоторые физические постоянные типа заряда и массы электрона. (Минимальная версия Стандартной Модели с одной скалярной частицей имеет 18 таких констант). Теории, в которых эта процедура работала, назывались перенормируемыми и имели более простую структуру, чем перенормируемые теории.

Именно эта простая перенормируемая структура Стандартной Модели позволяет нам получать точные количественные предсказания экспериментальных результатов, предсказания, чей успех подтвердил законность теории. В частности принцип перенормируемости совместно с различными принципами симметрии Стандартной Модели запрещает ненаблюдаемые процессы типа распада изолированных протонов и запрещает нейтрино иметь массу. Физики обычно имели обыкновение полагать, что квантовая теория поля, имеющая отношение к реальности, должна быть перенормируема. Этот принцип был господствующим в формулировках Стандартной Модели. И тот факт, что по фундаментальным причинам невозможно было сформулировать перенормируемую квантовую теорию гравитации, вселял в теоретиков большую тревогу.

Сегодня же положение дел изменилось. Разные теории в физике элементарных частиц различаются в зависимости от энергии рассматриваемых процессов и реакций. Взаимодействие, обусловленное обменом очень массивной частицы, будет чрезвычайно слабым при энергиях низких по сравнению с той массой. И другие эффекты также могут быть подавлены подобным образом, – такая область низких энергий рассматривается в эффективной теории поля, в которой эти взаимодействия являются ничтожными. Теоретики поняли, что любая фундаментальная квантовая теория, совместимая со специальной теорией относительности, превращается при низких энергиях в перенормируемую теорию. Но хотя бесконечности всё еще не допускаются в теорию, эти эффективные теории не имеют простой структуры классической перенормируемой теории. Вместо того чтобы полностью исключать дополнительные сложные взаимодействия, их делают сильно подавленными в области ниже некоторого характерного энергетического порога.

А гравитация и есть именно такое подавленное перенормируемое взаимодействие. Именно от его силы (или правильнее слабости) при низких энергиях мы делаем вывод, что его фундаментальная энергетическая шкала – примерно 10^{18} ГэВ. Другое подавленное перенормируемое взаимодействие делало бы протон нестабильным с периодом полураспада в диапазоне от 10^{31} до 10^{34} лет, который возможно не удастся зафиксировать даже и к 2050. Другое же подавленное перенормируемое взаимодействие сообщило бы нейтрино крошечные массы, приблизительно 10^{-11} ГэВ. Уже сейчас имеются некоторые доказательства, что массы нейтрино имеют именно такой порядок; окончательно же этот вопрос будет улажен задолго до 2050.

Такие наблюдения будут весьма полезны для объединенной теории всех сил, но построение этой теории, вероятно, не будет возможно без появления радикально новых идей. Некоторые из них уже выдвинуты и обсуждаются. Имеются пять различных теорий крошечных одномерных объектов, известных как струны, различные моды колебаний которых проявляются при низкой энергии как различные виды частиц и очевидно представляют собой соответствия конечным теориям гравитации и других сил в 10-мерном пространстве-времени. Конечно, мы не живем в 10 измерениях, но вероятно, что шесть из этих измерений могут быть свернуты настолько сильно, что они не наблюдаются в процессах при энергиях ниже 10^{16} ГэВ, приходящихся на одну частицу. Ясность во всем этом появилась лишь в последние несколько лет, когда оказалось, что эти пять струнных теорий (а также квантовая теория поля в 11 измерениях) – есть не что иное, как приближенные версии единственной фундаментальной теории (иногда называемой М-теорией). Но пока еще никто не знает, как записать уравнения этой теории.

Вне пространства и времени

Два больших препятствия стоят на пути к решению этой задачи. Одно – это то, что мы не знаем, какие физические принципы управляют такой фундаментальной теорией. В разработке общей теории относительности Эйнштейн руководствовался принципом, который он вывел из известных свойств гравитации, – принципом эквивалентности сил тяготения и инерционных эффектов типа центробежной силы. Развитие Стандартной Модели исходило из принципа калибровочной симметрии, который является обобщением известного свойства электричества,

зключающегося в том, что физический смысл имеет только разность потенциалов, но не сам потенциал непосредственно.

Но пока еще не обнаружен какой-либо фундаментальный принцип, исходя из которого можно было бы построить М-теорию. Различные аппроксимации к этой теории напоминают струнные или полевые теории в пространстве-времени различной размерности, но возможно, что новая фундаментальная теория вообще не должна формулироваться в терминах пространства-времени. Квантовая теория поля довольно сильно ограничена принципами, лежащими в основе природы четырехмерного пространства-времени, которые включены в специальную теорию относительности. Неизвестно, каким образом мы можем получить идеи, необходимые для верной формулировки новой фундаментальной теории, если эта теория должна описывать область, где все интуитивные представления, приобретенные нами из жизни в пространстве-времени, станут неподходящими?

Другое препятствие состоит в том, что, даже если мы были бы и способны сформулировать фундаментальную теорию, мы не могли бы знать, как ее использовать, чтобы делать предсказания, подтверждающие ее истинность. Большинство успешных предсказаний Стандартной Модели были основаны на методе вычисления, известном как теория возмущений. В квантовой механике вероятности физических процессов вычисляются суммированием по всем возможным последовательностям промежуточных шагов, через которые может происходить процесс. Используя теорию возмущений, вначале рассматривают только самые простые промежуточные шаги, потом более сложные, и так далее. Этот способ работает только в том случае, если всё более и более сложные промежуточные шаги дают уменьшающиеся вклады в вероятность; это обычно имеет место в том случае, если константа связи достаточно мала. Иногда теория с очень сильным взаимодействием эквивалентна другой теории с очень слабым взаимодействием, в которой применимы методы теории возмущений. Такое отношение эквивалентности действует для некоторых пар из пяти струнных теорий в 10 измерениях и теории поля в 11 измерениях, упомянутых ранее. К сожалению, взаимодействия фундаментальной теории, очевидно, не являются ни очень сильными, ни очень слабыми, исключая тем самым любое использование теории возмущений.

Поиск ответа

Мы не можем сейчас сказать, когда будут решены эти проблемы. Может оказаться, что они могут быть решены в препринте, написанным завтра каким-нибудь молодым теоретиком. А может оказаться, что они не будут решены и в 2050, или даже в 2150 году. Но даже когда они и будут решены, пока мы не сможем ставить эксперименты при энергиях 10^{16} ГэВ или изучать более высокие измерения, нас не будет беспокоить проблема проверки истинности фундаментальной объединенной теории. Помимо проверки, правильно ли теория объясняет измеренные значения физических постоянных Стандартной Модели, будущие эксперименты должны выявить новые эффекты, не предусмотренные в Стандартной Модели.

Возможно, что, когда мы наконец поймем, как частицы и силы ведут себя при энергиях до 10^{18} ГэВ, мы только столкнемся с новыми тайнами, а до заключительного объединения будет гораздо дальше, чем когда-либо до этого. Но я сомневаюсь относительно этого. Пока еще нет никаких намеков на то, что фундаментальная энергетическая шкала простирается дальше 10^{18} ГэВ, а теория струн даже предполагает, что более высокие энергии не имеют физического смысла.

Открытие объединенной теории, описывающей природу в условиях любых энергий, позволит нам ответить на самые глубокие вопросы космологии: имеет ли расширяющееся облако галактик, которое мы называем Большим Взрывом, начало во времени? Является ли Большой Взрыв только одним эпизодом истории вселенной, в которой большие и маленькие взрывы происходят вечно? Изменяются ли физические константы или даже законы природы от одного взрыва к другому?

Это не будет концом физики. Это, вероятно, даже не поможет нам в решении некоторых еще не решенных проблем сегодняшней физики, типа понимания турбулентности и высокотемпературной сверхпроводимости. Но это будет конец физики определенного типа, а именно поиска объединенной теории, которая влечет за собой все другие факты физической науки.

Перевод с английского *Андрея Крашеницы*