

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2004

## Асимптотическая свобода: от парадоксов к парадигмам

Ф.А. Вильчек

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2004 г.)

PACS numbers: 01.30.Bb, 11.10.Hi, 12.38.-t

### Содержание

1. Пара парадоксов (1325).  
1.1. Парадокс 1: кварки рождаются свободными, но встречаются только связанными. 1.2. Парадокс 2: специальная теория относительности и квантовая механика работают одновременно.
2. Разрешение парадоксов: антиэкранирование или асимптотическая свобода (1328).
3. Четыре парадигмы (1329).  
3.1. Парадигма 1: реальность кварков и глюонов. 3.2. Парадигма 2: масса происходит из энергии. 3.3. Парадигма 3: ранняя Вселенная была простой. 3.4. Парадигма 4: господство симметрии.
4. Главный урок (1336).
5. Эпилог (1336).

Список литературы (1337).

### 1. Пара парадоксов

В теоретической физике парадоксы играют положительную роль. Это кажется парадоксальным, так как парадокс указывает на противоречие, а противоречие подразумевает наличие серьезной ошибки. Но в природе противоречия не реализуются. Если наши физические теории приводят к парадоксам, мы обязаны искать выход. Тем самым парадоксы фокусируют наше внимание на проблеме и побуждают к поиску правильного решения.

Когда в 1972 г. мы с Дэвидом Гроссом начинали работу, приведшую нас к этой Нобелевской премии<sup>1</sup> [1–3], нами двигало желание разрешить парадоксы. Разрешая их, мы открыли новый динамический принцип — асимптотическую свободу. В свою очередь, этот принцип привел к расширенной концепции фундаментальных частиц, новому пониманию механизмов приобретения массы материей, новой и гораздо более прозрач-

ной, чем ранее, картине ранней Вселенной и новым идеям о единстве сил природы. Сегодня мне хотелось бы поделиться с вами этими идеями.

#### 1.1. Парадокс 1: кварки рождаются свободными, но встречаются только связанными

Первый парадокс был феноменологическим. В начале двадцатого века, после пионерских экспериментов Резерфорда, Гейгера и Марсдена, физики открыли, что большая часть массы и весь положительный заряд внутри атома сконцентрированы в крошечных ядрах. В 1932 г. Чедвик открыл нейтроны, которые вместе с протонами могли бы рассматриваться как составляющие атомного ядра. Однако известных тогда сил гравитации и электромагнетизма было недостаточно, для того чтобы связать протоны и нейтроны в такие малые объекты, как наблюдаемые ядра. Физики столкнулись с новым видом взаимодействия, самым сильным в природе. Объяснение этой новой силы стало основной задачей теоретической физики.

Для решения указанной проблемы физики в течение многих лет собирали данные, полученные, в основном, из изучения результатов столкновений протонов и нейтронов. Однако результаты этих исследований оказывались громоздкими и сложными.

Если бы частицы в указанных экспериментах были фундаментальными (неделимыми), то после их столкновения следовало бы ожидать те же частицы, только выходящие по измененным траекториям. Вместо этого на выходе, после столкновения, часто оказывалось множество частиц. Конечное состояние могло содержать как несколько копий исходных частиц, так и другие частицы. Многие новые частицы были открыты именно таким образом. Несмотря на то, что эти частицы, называемые адронами, были нестабильны, их свойства были очень схожи со свойствами нейтронов и протонов. Тогда характер исследования изменился. Уже не казалось естественным полагать, что речь идет просто об изучении новой силы, связывающей протоны и нейтроны в атомные ядра. Скорее, открылся новый мир явлений. Этот мир состоял из множества новых неожиданных частиц, преобразующихся друг в друга удивительно большим количеством способов. Отражением изменения во взглядах стало и изменение в терминологии.

<sup>1</sup> В силу специфики и рамок этой лекции, список литературы упрощен. Ссылки на основные, оригинальные, работы [1–3] оформлены аккуратно.

Ф.А. Вильчек (F.A. Wilczek) Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA

Вместо ядерных сил физики стали говорить о сильном взаимодействии.

В начале 1960-х годов Мюррей Гелл-Ман и Джордж Цвейг совершили огромный прорыв в теории сильного взаимодействия, предложив концепцию кварков. Если вы представите, что адроны не являются фундаментальными частицами, а состоят из некоторого числа неделимых кварков, то все становится на свои места. Десятки наблюдаемых адронов, по крайней мере в грубом приближении, можно объяснить различными возможными способами соединений всего трех типов ("ароматов") кварков. Один и тот же набор кварков может иметь различные пространственные орбиты и разнообразные спиновые конфигурации. Энергия такой системы будет зависеть от всех этих факторов, и таким образом получатся состояния с разными энергиями, соответствующие частицам с разными массами, согласно формуле  $m = E/c^2$ . Это аналогично тому, как спектр возбужденных состояний в атоме мы понимаем как проявление различных орбит и спиновых конфигураций электронов. (Правда, энергии взаимодействия электронов в атомах относительно малы, и влияние этих энергий на полную массу атома незначительно.)

Тем не менее правила использования кварков для описания реалистических моделей казались довольно странными и непонятными.

Предполагалось, что кварки едва ли чувствуют присутствие друг друга, когда находятся рядом, но если вы попытаетесь их изолировать друг от друга, то обнаружите, что это невозможно. Усиленные попытки найти изолированный夸克 успехом так и не увенчались. Наблюдаемыми оказались только связанные состояния кварка с антiquarkом (мезоны) и трех кварков (барионы). Этот принцип, выведенный из экспериментальных наблюдений, называли конфайнментом. Однако возвышенное название не сделало само явление менее таинственным.

Была у кварков и еще одна примечательная особенность. Предполагалось, что их электрические заряды являются дробными ( $1/3$  или  $2/3$ ) по отношению к основному единичному заряду, например, электрона или протона. Все остальные наблюдаемые заряды известны с большой точностью и кратны основному. Кроме того, тождественные кварки не подчиняются обычным правилам квантовой статистики. Эти правила требуют, чтобы кварки, как частицы со спином  $1/2$ , были фермионами с антисимметричными волновыми функциями (если не учитывать цветовую симметрию). Однако наблюдаемые данные о барионах не могут быть объяснены с помощью антисимметричных волновых функций — они должны быть симметричными.

Атмосфера таинственности вокруг свойств кварков еще более сгущалась, когда Дж. Фридман, Г. Кендалл, Р. Тейлор и их коллеги на линейном ускорителе в Стенфорде (SLAC) направили фотоны с высокой энергией на протоны и обнаружили внутри нечто вроде кварков<sup>2</sup>. Неожиданным было то, что при сильных столкновениях кварки двигаются (точнее, переносят энергию и импульс) так, как если бы они были свободными частицами. До этого эксперимента большинство

физиков предполагало, что каким бы ни было сильное взаимодействие кварков, оно должно заставить кварки обильно излучать энергию, и, следовательно, после резкого ускорения энергия движения должна быстро рассеиваться.

С некоторой долей искушенности можно сказать, что связь излучения с силами была неизбежной и содержательной. Действительно, связь между силами и излучением напоминает нам о самых ярких эпизодах в истории физики. В 1864 г. Максвелл предсказал существование электромагнитного излучения (включая обычный свет, но и не только его) как следствие своей самосогласованной и всеобъемлющей формулировки электрических и магнитных сил. В 1883 г. это новое излучение было сгенерировано и зарегистрировано Герцем (в двадцатом веке развитие этих опытов привело к революции в средствах коммуникации и многому другому). Значительно позже, в 1935 г., Юкава предсказал существование пионов, основываясь на своих исследованиях ядерных сил. Эти частицы действительно были обнаружены в конце 1940-х годов; существование многих других адронов было предсказано с помощью обобщения этих идей. (Для экспертов: я имею в виду множество резонансов, которые изначально наблюдались при анализе парциальных волн, а затем в процессах рождения частиц.) Сравнительно недавно существование  $W$ - и  $Z$ -бозонов, а также цветных глюонов и их свойства были также предсказаны до соответствующих экспериментов. В 1972 г. эти открытия были еще впереди, но и на этом примере видно, что возникновение интереса было не случайным. Казалось бы, чем сильнее взаимодействие, тем мощнее соответствующее ему излучение. Когда самое сильное взаимодействие в природе не подчиняется этому правилу, мы вправе говорить о парадоксе.

## 1.2. Парадокс 2: специальная теория относительности и квантовая механика работают одновременно

Второй парадокс более концептуален. Квантовая механика и теория относительности — две великие теории в физике двадцатого века. И обе очень успешные. Однако эти теории базируются на изначально разных идеях, которые довольно непросто примирить друг с другом. В частности, в специальной теории относительности (СТО) пространственные и временное измерения рассматриваются как равноправные, а в квантовой механике эти измерения сильно отличаются по смыслу. Разрешение этого противоречия привело к трем предшествующим Нобелевским премиям (сюда же можно отнести и нашу).

Первая из них досталась П.А.М. Дираку в 1933 г. Представьте частицу, движущуюся со средней скоростью, очень близкой к скорости света, но с неопределенностью местоположения, как того требует квантовая механика. Очевидно, с некоторой вероятностью скорость частицы может оказаться несколько выше средней и, следовательно, выше скорости света, что запрещено специальной теорией относительности. Единственный способ разрешить противоречие включает в себя допущение о существовании античастицы. Грубо говоря, требуемая неопределенность в местоположении удовлетворяется, если допустить, что в процессе измерения могут рождаться несколько частиц, неотличимых от начальной и находящихся в разных точках пространства. Для поддержания баланса сохраняющихся кванто-

<sup>2</sup> Дж. Фридман, Г. Кендалл и Р. Тейлор получили Нобелевскую премию за эту работу в 1990 году.

вых чисел дополнительные частицы должны появляться в паре со своими античастицами. (В отличие от моих эвристических соображений, Дирак предсказал существование античастиц, используя остроумную интерпретацию открытого им релятивистского уравнения. Оглядываясь сейчас в прошлое, мы понимаем, что его умозаключения и их связь с квантовой механикой и специальной теорией относительности были неизбежны.)

Второй и третьей из отмеченных мною премий были удостоены Р. Фейнман, Дж. Швингер и С.-И. Томонага (1965), а также 'т Хофт и Вельтман (1999). Основной задачей, которой в той или иной степени занимались все эти ученые, была проблема ультрафиолетовых расходимостей.

С учетом СТО квантовая теория должна позволять энергии флюктуировать на коротких отрезках времени. В этом состоит обобщение принципа дополнительности в обычной, нерелятивистской, квантовой механике. Проще говоря, энергию на короткое время можно одолжить, чтобы создать виртуальные частицы, включая пары частица – античастица. Каждая пара исчезает вскоре после своего появления, но для установления равновесного распределения снова и снова возникают новые пары. В этом смысле можно сказать, что волновая функция пустого пространства становится нетривиальной, а сам вакуум густо заселен виртуальными частицами, или, другими словами, становится динамически активной средой.

Проблема возникает при рассмотрении виртуальных частиц с очень большими энергиями. Вычисление поправок к процессам с реальными частицами, появляющимися за счет взаимодействия с виртуальными, приводит к расходящимся ответам, причем именно из-за виртуальных частиц с очень большими энергиями.

Эта проблема в свою очередь происходит из проблемы, сформулированной Планком и инициировавшей развитие квантовой теории поля. Речь идет об "ультрафиолетовой катастрофе" при излучении абсолютно черного тела. Проблема состояла в том, что высокозергетические моды электромагнитного поля с точки зрения классической физики должны проявляться как тепловые флюктуации, причем из требования, что при любой температуре существует положение равновесия, следовало, что эти моды содержат бесконечную энергию. Проблема возникает при рассмотрении флюктуаций с малыми амплитудами и быстрыми вариациями в пространстве и времени. Элемент дискретности, введенный квантовой теорией, накладывает ограничение снизу на их размер и, следовательно, устраниет возможность флюктуаций с очень малыми амплитудами. Флюктуации с относительно большими амплитудами, как предсказывается, возникают редко и проблем не создают. Но квантовые флюктуации, по сравнению с тепловыми, оказываются более эффективными в создании высокозергетических мод в виде виртуальных частиц, и эти моды снова преследуют нас. Например, они дают расходящийся вклад в энергию вакуума.

Для преодоления этих трудностей была создана теория перенормировок. В основе этой теории лежит наблюдение, что хотя взаимодействие высокозергетических виртуальных частиц и приводит к расходимостям, эти расходимости обладают специфической структурой. А именно, одни и те же поправки возникают снова и снова для различных физических процессов. Например, в

квантовой электродинамике (КЭД) существует в точности два типа расходящихся выражений. Первое появляется при вычислении поправки к массе электрона, а второе — при вычислении поправки к его заряду. Для того чтобы вычисления были корректно определены с математической точки зрения, мы должны каким-то образом исключить вклад от высокоэнергетических мод, т.е. подавить соответствующие взаимодействия. Такая процедура называется обрезанием или регуляризацией. В конце концов мы хотим избавиться от регуляризации, но на промежуточной стадии необходимы конечные выражения. Взяв значения массы и заряда электрона из эксперимента, мы можем отождествить их с формальными ответами, полученными из вычислений и включающими расходимости. Такое отождествление позволяет избавиться от расходимостей, а следовательно, и от процедуры регуляризации. Так как в КЭД существует всего два типа расходимостей, любой результат можно выразить в терминах экспериментальных значений.

Фейнман, Швингер и Томонага развили в КЭД технику написания поправок, возникающих вследствие взаимодействия с любым конечным числом виртуальных частиц, и доказали перенормируемость в простейшем случае. (Я несколько неаккуратен в используемой мной терминологии; вместо количества виртуальных частиц следует скорее говорить о количестве внутренних петель в диаграммах Фейнмана.) Фриман Дайсон привел полное доказательство. Оно было сложным и потребовало развития новой техники вычислений. 'т Хофт и Вельтман показали, что свойством перенормируемости обладает гораздо более широкий класс теорий, включающий в себя калибровочные теории со спонтанным нарушением симметрии, которые Глэшоу, Вайнберг и Салам использовали для создания Стандартной модели электрослабых взаимодействий. И снова это была новаторская и технически сложная работа.

Однако и эта блестящая работа не выявила всех сложностей. Очень глубокую проблему обнаружил Ландау [4]. Его аргумент состоял в том, что виртуальные частицы будут скапливаться вокруг реальной до тех пор, пока существует ненулевое взаимодействие. Этот эффект называется экранированием. Процесс накопления может остановиться только в том случае, когда источник вместе со своим облаком виртуальных частиц перестанет влиять на новые виртуальные частицы. Но это означает, что когда процесс остановится, взаимодействие исчезнет!

Тем самым, все выдающиеся работы по КЭД и более общим теориям поля, согласно Ландау, оказались не более чем временными исправлениями. Вы можете получить конечный ответ, если учтете эффект от любого конечного числа виртуальных частиц. Однако при попытке учесть все возможные вклады вы получите бессмысленный результат: одновременно и расходящиеся ответы, и отсутствие взаимодействия.

Ландау и его коллеги проверили вычислениями эту догадку на различных примерах. Во всех исследованных случаях эффект экранирования был подтвержден. Это можно было трактовать как приговор любым вычислениям, основанным на последовательном увеличении числа виртуальных частиц. Мы можем замести эту проблему под ковер в случае КЭД или теории электрослабых взаимодействий, так как для этих теорий ответы, полученные из рассмотрения малого количества вирту-

альных частиц, совпадают с экспериментальными данными с высокой точностью. Однако для сильного взаимодействия такой подход может оказаться несостоятельным, так как нет причин ожидать, что большое количество виртуальных частиц вносит пренебрежимо малый вклад в итоговый результат.

Ландау полагал, что его аргумент разрушил квантовую теорию поля как способ примирения квантовой механики и СТО. В конце концов как квантовая механика, так и СТО могли бы быть неверны, или должен был появиться новый, отличный от квантовой теории поля, метод непротиворечивого описания квантовых и релятивистских эффектов. Ландау не был расстроен таким заключением, так как квантовая теория поля не давала удовлетворительного описания сильных взаимодействий, несмотря на многочисленные попытки это сделать. Однако ни он, ни кто-либо другой не предложили подходящей альтернативы.

Итак, мы пришли к парадоксу, состоящему в том, что объединение квантовой механики и СТО неизбежно ведет к квантовой теории поля, которая, несмотря на значительные успехи, логически противоречива вследствие эффекта экранирования.

## **2. Разрешение парадоксов: антиэкранование или асимптотическая свобода**

Указанные парадоксы были разрешены с помощью открытой нами асимптотической свободы.

Мы обнаружили, что некоторые очень специальные теории поля обладают свойством антиэкранования, и назвали его асимптотической свободой по причине, которая скоро станет понятной. Прежде чем описывать эти специфические теории, я бы хотел на самом доступном уровне объяснить, как феномен антиэкранирования позволяет разрешить наши парадоксы.

Антиэкранование переворачивает проблему Ландау с ног на голову. В случае экранирования источник воздействия — будем называть его зарядом, держа в уме, что это нечто отличное от электрического заряда — индуцирует появление компенсирующего облака виртуальных частиц. Большой заряд, расположенный в центре облака, слабо действует на больших расстояниях. Антиэкранование, или асимптотическая свобода, напротив, подразумевает, что заряд малой величины катализирует появление облака виртуальных частиц, увеличивающих его мощность. Мне нравится представлять это себе в виде грозовой тучи, которая становится толще при удалении от центра.

Так как виртуальные частицы сами являются заряженными, этот рост самоусиливается по мере удаления от источника. Ситуация выходит из-под контроля. То есть для наращивания грозовой тучи требуется энергия, и количество этой энергии стремится к бесконечности. Если это так, то изначальный заряд не мог бы появиться. Тем самым мы открыли способ избежать диагноза Ландау, устранив пациента!

На данном этапе наш первый парадокс, конфайнмент кварков, становится теоретической необходимостью. То есть можно предположить, что кварки и есть те самые настоящие заряды, которые не могут существовать по отдельности. При этом природа учит нас, что в связанном состоянии эти частицы могут служить строитель-

ными блоками. Если по соседству с частицей-источником расположена ее античастица (например, кварк и антикварк), то расходящийся рост антиэкранирующей грозовой тучи уже не является неизбежным. Облака, создаваемые каждой из частиц, будут перекрываться и сокращать друг друга. Связанные вместе кварк и антикварк могут обладать конечной энергией, в то время как каждый из них по отдельности существовать не может.

С точки зрения экспериментальных данных мы должны были объяснить причину отсутствия излучения у кварков в опытах Фридмана, Кендала и Тейлора на ускорителе. Это удивительное свойство также является следствием антиэкранирования. Действительно, цветовой заряд кварка мал на малом расстоянии. Он набирает свою величину на больших расстояниях благодаряирующему сильновзаимодействующему облаку. Так как величина заряда самого кварка мала, он довольно слабо взаимодействует со своим облаком. Мы могли бы вырвать его из окружающей тучи, и он в течение короткого времени вел бы себя как частица без цветового заряда. Виртуальные частицы будут откликаться на изменение ситуации и создавать новое облако, движущееся вместе с кварком. Но этот процесс не связан с излучением энергии. На наш взгляд, именно по этой причине появилась возможность анализировать примечательные аспекты эксперимента на установке SLAC: инклузивные сечения, которые сохраняют трек только полного потока энергии-импульса, выглядели так, как если бы кварки были свободными частицами, хотя на самом деле они являются сильновзаимодействующими и существуют только в связанных состояниях.

Таким образом, оба парадокса оказались связанными друг с другом и одновременно разрешились благодаря эффекту антиэкранирования.

Теории, в которых была обнаружена асимптотическая свобода, были названы неабелевыми калибровочными теориями, или теориями Янга–Миллса [5]. Они представляют собой обобщение электродинамики. В них постулируется существование нескольких типов зарядов и связывающей их симметрии. То есть вместо одного единственного "заряда" мы имеем дело с несколькими "цветами". Соответственно, вместо одного фотона появляется семейство цветных глюонов.

Цветные глюоны обладают цветовым зарядом. В этом отношении неабелевы теории отличаются от электродинамики, в которой фотон является электрически нейтральным. Таким образом, глюоны в неабелевых теориях играют гораздо более активную роль, чем фотоны в электродинамике. Например, именно виртуальные глюоны ответственны за наличие антиэкранирования, которое отсутствует в КЭД.

Достаточно скоро стало очевидно, что именно одна конкретная теория с асимптотической свободой подходит на роль кандидата для теории сильных взаимодействий. На феноменологическом уровне существовала необходимость классифицировать барионы как частицы, состоящие из трех кварков, а также мезоны, состоящие из пар кварков и соответствующих антикварков. В свете нашего обсуждения это означает, что цветовые заряды трех кварков могут взаимно сокращаться. Это происходит, когда данные три цвета исчерпывают все возможности; таким образом, мы пришли к концепции калибровочной группы SU(3) с тремя цветами и восемью глюонами. Честно говоря, несколько физиков предло-

жили трехцветную концепцию для описания夸арков несколько раньше<sup>3</sup>. Не требовалось особого воображения, чтобы адаптировать эту идею к нашим жестким условиям.

Используя сложную технику вычислений в квантовой теории поля (включая ренормгруппу, операторное разложение и подходящие дисперсионные соотношения), мы могли опираться на гораздо большее число специальных количественных аргументов в пользу причастности нашей теории к описанию физических явлений, чем я в своем умозрительном изложении. В частности, сильное взаимодействие не выключается внезапно, и существует ненулевая вероятность излучения кварка при столкновении. Только асимптотически, когда энергии стремятся к бесконечности, вероятность излучения стремится к нулю. Мы имели возможность проводить вычисления наблюдаемых эффектов, связанных с излучением при конечных энергиях, и сделать предсказания для экспериментов. К тому моменту и в течение еще нескольких лет данные были недостаточно точны для того, чтобы их можно было сравнить с предсказаниями. Но к концу 1970-х годов они стали выглядеть довольно хорошо, а к настоящему моменту — просто превосходно.

Открытие нами асимптотической свободы и единственность ее реализации в квантовой теории поля привели нас к новому взгляду на проблемы сильного взаимодействия. Вместо фрагментарных исследований, характерных для ранних работ, теперь мы имели единственного выделенного кандидата на роль теории сильных взаимодействий. Кандидата, который мог быть подвергнут проверке и, возможно, отвергнут, но при этом не являлся пустой выдумкой.

Подводя итог, давайте вспомним, что предложенные теории оказались выделенными природой, если всерьез принимать во внимание полученные на установке SLAC результаты и ренормгрупповой подход к квантовой теории поля.

Вспоминая то время, я вновь переживаю смесь оживления и тревоги.

### 3. Четыре парадигмы

Парадоксы, которые нам удалось разрешить, получили неожиданные продолжения, далекие от исходных целей.

#### 3.1. Парадигма 1: реальность кварков и глюонов

Для соответствия с экспериментальными данными оказалось необходимым снабдить кварки несколькими неожиданными свойствами, такими, как дробный заряд, парадоксальными свойствами динамики и аномальной статистикой. Поэтому в 1972 г. их реальность все еще оставалась под вопросом. И это несмотря на то, что с их помощью можно было объяснить существование адронов и даже на то, что Фридман, Кендал и Тейлор уже обнаружили их! Экспериментальные данные, конечно, никуда не исчезли, но их окончательная интерпретация вызывала сомнения. Являются ли кварки простейшими частицами, которые следует использовать для фундаментальной теории, или они только лишь промежуточный инструмент, который нужно заменить более глубокой концепцией?

<sup>3</sup> Самой ясной из ранних работ, в которой была описана динамическая роль цветовой симметрии, является работа [6].

Сейчас, когда нам известно развитие этой истории, требуется некоторое воображение, чтобы придумать альтернативный ход событий. Но природа, как и физики-теоретики, обладает богатым творческим воображением, поэтому разнообразные альтернативные варианты представляются вполне возможными.

Например, в дробном квантовом эффекте Холла наблюдаются квазичастицы, которые не являются простейшими, а, скорее, представляют собой коллективные возбуждения электронов. При этом такие частицы так же, как и кварки, не могут существовать изолированно, они обладают дробным зарядом и аномальной статистикой! Подобное предполагается и в модели Скирма, где ядра рассматриваются как коллективные возбуждения пионов. Можно было бы предположить, что и для кварков может реализоваться подобный сценарий, в котором они будут коллективными возбуждениями адронов или более фундаментальных преонов или струн.

Вместе с новым взглядом на сильное взаимодействие возник и новый взгляд на кварки и глюоны. Теперь их уже воспринимали не как эмпирические объекты или строительные блоки в грубой феноменологической модели. Кварки и, особенно, глюоны стали рассматриваться как простейшие частицы, свойства которых полностью определены математически точными алгоритмами.

Вы даже можете их наблюдать! Это можно увидеть из рис. 1, который я вскоре разъясню.

Асимптотическая свобода оказалась чрезвычайно удобной для экспериментальной физики, так как приводит к замечательному явлению струй. Как я уже отмечал ранее, атмосфера таинственности вокруг кварков во многом обязана конфайнменту. Однако если мы сфокусируем наше внимание на потоке энергии и импульса, а не на отдельных адронах, то кварки и глюоны можно экспериментально наблюдать, и сейчас мы увидим каким образом.

Имеется существенное различие между двумя типами излучения, и в этом различии заключен смысл асимптотической свободы. Жесткое излучение, способное существенным образом менять направление потока энергии и импульса, возникает редко. Чаще наблю-

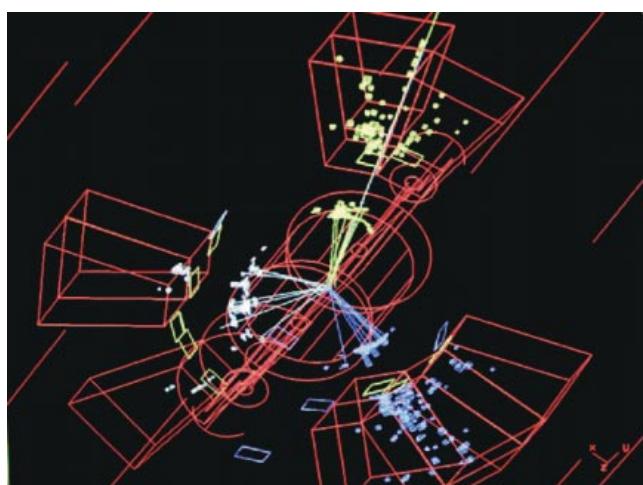


Рис. 1. На снимке, любезно предоставленном коллаборацией L3, ЦЕРН, изображены три струи, образовавшиеся при электрон-позитронной аннигиляции при высоких энергиях. Эти струи материализуют кварк, антикварк и глюон.

даетсямягкое излучение, которое создает дополнительные частицы, движущиеся в одном направлении без отклонений от исходного потока.

Это происходит потому, что мягкое излучение связано с обсуждавшимся ранее наращиванием облаков. Посмотрим, какое значение это имеет для эксперимента. Чтобы быть более точным, будем говорить об экспериментах, проведенных на большом электрон-позитронном коллайдере (LEP) в ЦЕРНе в 1990-е годы, которые будут продолжены на международном линейном коллайдере (ILC) в будущем. В этих экспериментах проводились исследования столкновений высокогенергетических электронов и позитронов. Из теории электросла-бых взаимодействий мы знаем, что интересующий нас процесс аннигиляции происходит с испусканием виртуального фотона или Z-бозона, которые превращаются в кварк и антикварк, движущиеся в противоположных направлениях с большими скоростями. В отсутствие жесткого излучения мягкое излучение превратит кварк в пучок адронов, движущихся в одном направлении, т.е. в струю. Аналогично, антикварк создаст свою струю, движущуюся в противоположном направлении. Таким образом, наблюдаемым событием является регистрация двух струй. Время от времени (в 10 % случаев на установке LEP) происходит жесткое излучение, сопровождаемое испусканием глюона в каком-то другом направлении. В этом случае регистрируются три струи, как показано на рис. 1. Диаграммы соответствующих процессов изображены на рис. 2. Примерно в 1 % случаев регистрируется четыре струи и т.д. Относительные вероятности событий с различным числом струй, равно как и относительное распределение по углам, указывающее направление струй, а также распределение по энергиям для разных событий — все эти данные по "диаграмме направленности" могут быть предсказаны количественно. Эти предсказания отражают ряд общих принципов, связывающих кварки и глюоны, и являются определяющими для КХД.

Предсказания хорошо согласуются с обширными экспериментальными данными.

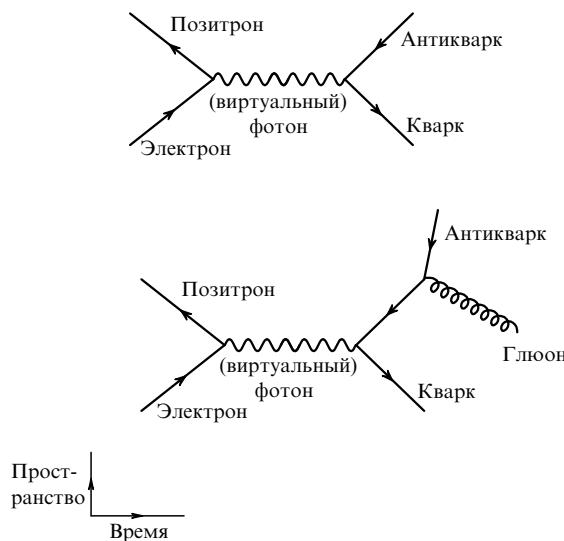


Рис. 2. На приведенных диаграммах Фейнмана схематично представлены процессы электрон-позитронной аннигиляции в пространстве-времени, соответствующие событиям из двух и трех струй.

Тем самым мы можем с уверенностью констатировать, что КХД верна и что на рис. 1 видны именно кварк, антикварк и глюон, хотя вследствие статистического характера предсказаний мы не можем точно утверждать, какая конкретно струя соответствует каждой из частиц!

Разрабатывая идею о том, что только жесткое излучение (отражающее фундаментальные свойства взаимодействия кварков и глюонов) влияет на полный поток энергии и импульса в высокогенергетических процессах, мы можем предсказать результаты для многих экспериментов. В большинстве приложений, включая и глубоконеупругое рассеяние, анализ и способы визуализации, необходимые для разделения жесткого и мягкого излучений, являются гораздо более сложными по сравнению с электрон-позитронной аннигиляцией. Много изобретательности и таланта уже вложено и продолжает вкладываться в этот предмет, известный как пертурбативная КХД. Полученные результаты вселяли оптимизм, так как оказались довольно удачными. Один из таких результатов представлен на рис. 3. Много различных экспериментов, выполненных при различных энергиях, подтвердили предсказательную силу КХД, причем каждый из них соответствовал своему значению константы связи. То есть необходимо было не только подтвердить данные каждого эксперимента, основанного на сотнях независимых измерений, но и выяснить, соответствуют ли эти данные предсказанному виду зависимости константы связи от шкалы энергии. Как вы можете видеть (рис. 3), это именно так. Примечательной наградой за успех теории, который я с удовольствием наблюдал, стало то, что многие вычисления, которые следовало бы называть контрольными проверками, теперь называют техническими подробностями.

В результате всех указанных достижений появилась новая концепция фундаментальных частиц. Физики про-

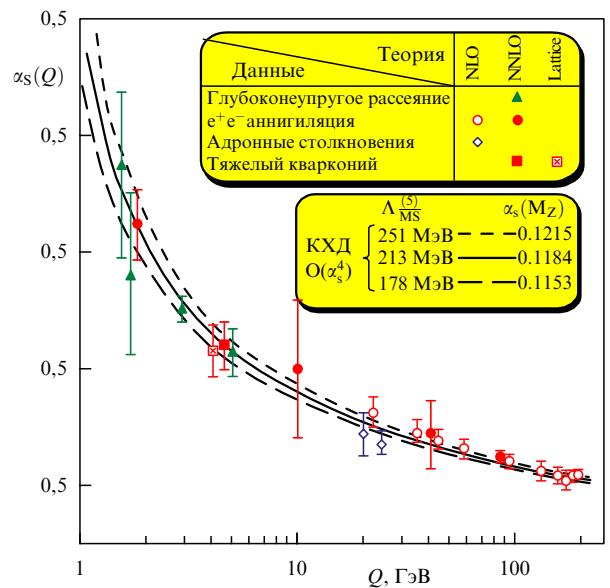


Рис. 3. Множество разнообразных экспериментов, выполненных при разных энергиях, были успешно обработаны методами КХД. Каждый из них вносил уточнение в измерение единственного параметра — константы сильного взаимодействия  $\alpha_s$ . Благодаря полученным данным предсказанное поведение константы связи было подтверждено. Рисунок любезно предоставлен С. Бетке [7].

водят эксперименты и интерпретируют их в терминах рождения и детектирования кварков и глюонов, имея в виду струи.

### 3.2. Парадигма 2: масса происходит из энергии

Мой друг и наставник Сэм Трейман любил вспоминать, как во время Второй мировой войны армия США подверглась испытанию, состоящему в подготовке большого количества радиоинженеров, имеющих изначально самую разную квалификацию, вплоть до полного ее отсутствия. Был специально разработан интенсивный курс, который как раз преподавал Сэм. Первая глава методического пособия была посвящена трем законам Ома. Первый закон Ома гласил:  $V = IR$ . Второй —  $I = V/R$ . Третий закон, полагаю, вы можете без труда сформулировать самостоятельно.

Аналогично, вспоминая знаменитое уравнение Эйнштейна  $E = mc^2$ , мы можем сформулировать второй закон Эйнштейна как  $m = E/c^2$ .

Все это не так уж и глупо, как может показаться, поскольку различные формы записи одного и того же уравнения могут иметь различные интерпретации. Стандартный способ записи уравнения  $E = mc^2$  говорит о возможности получения большого количества энергии за счет небольшой массы. Это ассоциируется с ядерными реакторами и атомными бомбами. Сформулированное в виде  $m = E/c^2$ , это же уравнение дает возможность объяснить происхождение массы в терминах энергии. И это выглядит довольно привлекательно, так как в современной физике понятие энергии является более общим. На самом деле, в оригинальной работе Эйнштейна содержится именно уравнение  $m = E/c^2$ . А название этой работы таково: "Зависит ли инерция тела от его энергии?" С самого начала Эйнштейн размышлял о происхождении массы, а не о бомбах.

Современная КХД отвечает на вопрос Эйнштейна громовым "Да"! Действительно, масса обычного вещества набирается практически полностью из энергии — энергии безмассовых глюонов и почти безмассовых кварков, которые являются составляющими для протонов, нейтронов, а следовательно, и для атомных ядер.

Наращивание антиэкранирующих облаков, о котором я уже говорил, не может продолжаться беспрепядельно. Ведь при таком сценарии результирующее цветовое поле должно обладать бесконечной энергией, а это невозможно. Цветовой заряд, угрожающий развитием такого сценария, должен быть скомпенсирован. Цветовой заряд кварка может быть сокращен как антракварком (тогда они образуют мезон), так и парой кварков с дополняющими цветами (в этом случае получается барион). В обоих случаях полное сокращение будет иметь место, если все необходимые кварки расположены в одной точке пространства, тогда нескомпенсированных источников цветового заряда не останется, а следовательно, не будет и цветового поля. Однако квантовая механика не разрешает такого точного сокращения. Кварки и антракварки описываются волновыми функциями, пространственные градиенты которых стоят энергии. Цена за такую локализацию волновых функций в малой области слишком велика. Итак, желая минимизировать энергию, мы приходим к противоречию: для минимизации энергии поля необходимо точно сократить заряды, а для минимизации энергии локализации волновой функции следует держать источник размытым.

Стабильные конфигурации основаны на различных компромиссах между этими факторами. В каждой такой конфигурации будет и энергия поля, и энергия локализации. Именно таким образом, согласно формуле  $m = E/c^2$ , и возникает масса. Устойчивые конфигурации представляют собой наблюдаемые частицы с различными массами, а метастабильные конфигурации также соответствуют массивным частицам, но с конечным временем жизни.

Определение стабильных конфигураций и предсказание масс барионов и мезонов является тяжелой работой. Это требует выполнения сложных параллельных вычислений на компьютерах. Мне кажется довольно забавным, что, вычисляя массу протона, мы привлекаем к этому что-то вроде  $10^{30}$  протонов и нейтронов, производящих триллионы умножений в секунду и работающих месяцами. При этом самому протону достаточно для этого  $10^{-24}$  секунды. Возможно, это следует назвать парадоксом. В конце концов, можно предположить, что существуют более эффективные способы вычислений, нежели те, которыми мы пользуемся в настоящее время.

В любом случае результаты этих вычислений доставляют удовольствие. Они изображены на рис. 4. Наблюдаемые массы барионов и мезонов воспроизведены достаточно хорошо, хотя и восстановлены по жестко определенной теории. Теперь пришло время заметить, что один из типов данных, помеченный на рис. 3 как "решетка", существенно отличается от других по своим принципам. Он основан не на пертурбативной физике жесткого излучения, а, скорее, на непосредственном сравнении численного интегрирования полной системы уравнений КХД с экспериментом с использованием техники решеточных калибровочных теорий.

Успех этих вычислений окончательно разрешил два наших парадокса:

- Вычисленный спектр частиц не содержит ни зарядов, ни каких-либо других квантовых чисел кварков и, конечно, не содержит безмассовых глюонов. Наблюдаемые частицы не описываются непосредственно фунда-

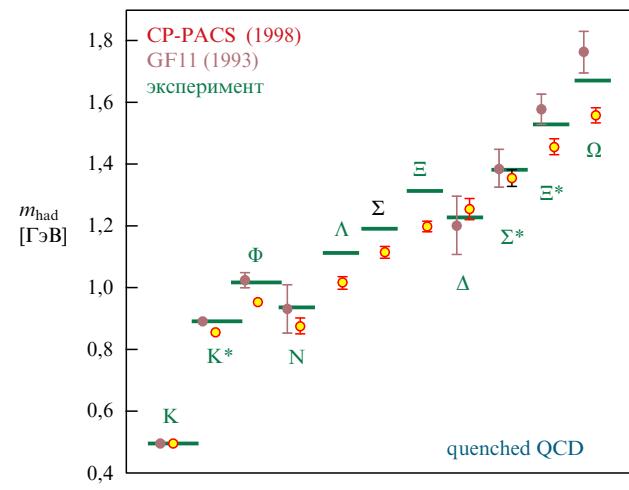


Рис. 4. Сравнение наблюдаемых адронных масс со спектром, полученным численным интегрированием уравнений КХД на компьютере. Небольшие несовпадения объясняются необходимыми для численных вычислений приближениями. Рисунок любезно предоставлен Центром вычислительной физики, университет Цукубы.

ментальными полями, из которых они в конечном итоге появляются.

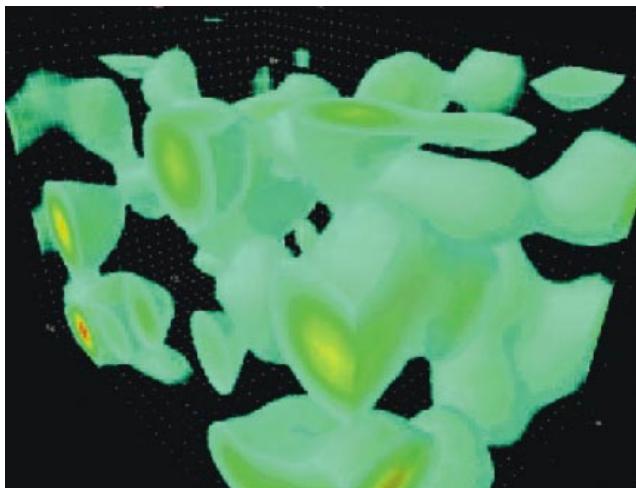
- Решеточная дискретизация квантовой теории поля порождает процедуру обрезания, не зависящую от разложения по количеству петель. Процедура перенормировки соответствует устремлению шага решетки к нулю. Асимптотическая свобода играет здесь ключевую роль, так как спасает от катастрофы Ландау.

Сравнивая различные детали в распределении масс, можно получить оценку для масс кварков и узнать, каков их вклад в массу протона и нейтрона. Оказывается, то, что я называю "QCD Lite" — версия КХД, в которой массы u- и d-кварков считаются равными нулю, а остальные кварки полностью игнорируются — дает замечательно хорошие результаты. Так как "QCD Lite" является теорией, в которой строительные блоки безмассовые, то можно говорить о том, что значительная часть массы обычной материи — 90 % или более — происходит из энергии по формуле  $m = E/c^2$ .

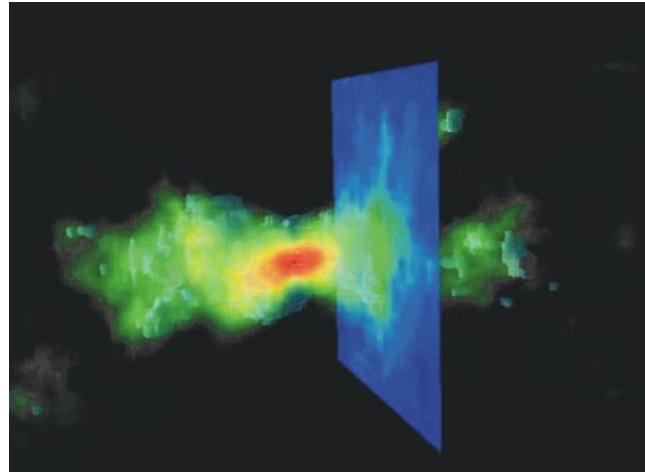
Вычисления можно использовать для получения различных радующих глаз анимационных картин. Дерек Лайнвебер сделал поразительные анимации для флукутаций полей КХД в вакууме. На рисунке 5 изображен кадр из его анимации. Рисунок 6 дает изображение цветового поля пионов, движущегося в пространстве-времени. Добавление кварк-антикварковой пары, которую мы впоследствии уберем, производит изображенное возмущение полей.

Эти картинки делают более понятной и доступной мысль о том, что квантовый вакуум является динамической средой, свойства которой существенно влияют на поведение материи. В квантовой механике энергии соответствует волна с частотой, вычисляемой по закону Планка  $E = h\nu$ . Массам адронов, тем самым, можно сопоставить тона, излучаемые динамической средой пространства при различных возбуждениях. Частота тона определяется формулой

$$\nu = \frac{mc^2}{\hbar}. \quad (3.1)$$



**Рис. 5.** Моментальный снимок спонтанных флукутаций полей глюонов (рисунок любезно предоставлен Д. Лайнвебером [8]). Для экспертов: изображена плотность топологического заряда, дающая типичный вклад в функциональный интеграл при выбрасывании высокочастотных мод.



**Рис. 6.** Показано итоговое распределение энергии, образовавшееся в результате появления и исчезновения пары кварк–антикварк (рисунок любезно предоставлен Г. Килкапом [9]). Вычисляя энергию этих полей и энергию аналогичных полей, произведенных другими возмущениями, оказывается возможным предсказать массы адронов. Можно сказать, что эти поля и есть адроны.

Можно сказать, что поняв природу массы, мы открыли музыку вакуума. Это, пожалуй, современное воплощение неуловимой и мистической "Музыки сфер".

### 3.3. Парадигма 3: ранняя Вселенная была простой

В 1972 г. ранняя Вселенная казалась чем-то совершенно непостижимым. В условиях очень высоких температур, имевших место после Большого Взрыва, появилось большое количество адронов, являющихся протяженными объектами и сложным образом взаимодействующими со своими соседями. Они начинают перекрывать друг друга, в результате чего получается неподдающийся теоретическому анализу беспорядок.

Однако асимптотическая свобода представила высокие температуры в положительном свете. Действительно, если мы перейдем от описания адронов к описанию кварков и глюонов и станем следить за потоками энергии, к которым мягкое излучение не чувствительно, то эффекты, связанные с сильным взаимодействием, становятся достаточно простыми. В первом приближении можно считать, что кварки, антикварки и глюоны ведут себя как свободные частицы, а далее рассмотреть более редкие эффекты, связанные с жестким излучением. Это позволяет делать довольно точные предсказания свойств материи при экстремально высоких температурах и, следовательно, облегчить решение различных задач космологии.

Оказывается, даже в наземной лаборатории можно создать условия для воспроизведения Большого Взрыва, правда в очень малом объеме пространства-времени. При столкновении тяжелых ионов в условиях высоких температур рождается файербол, который быстро разогревается до 200 МэВ. Польза такого опыта состоит не столько в анализе веществ, образовавшихся в результате взрыва, сколько в детальном изучении условий образования исходного файербола и проверке того, что он состоял из кварк-глюонной плазмы.

### 3.4. Парадигма 4: господство симметрии

В течение двадцатого столетия именно симметрия в огромной степени стала наиболее плодотворным источником появления новых взглядов на фундаментальные свойства природы. В частности, КХД является уникальной теорией с реализацией такой громадной калибровочной группы, как локальная калибровочная  $SU(3)$ -симметрия (действующая вместе с СТО в квантовой теории поля).

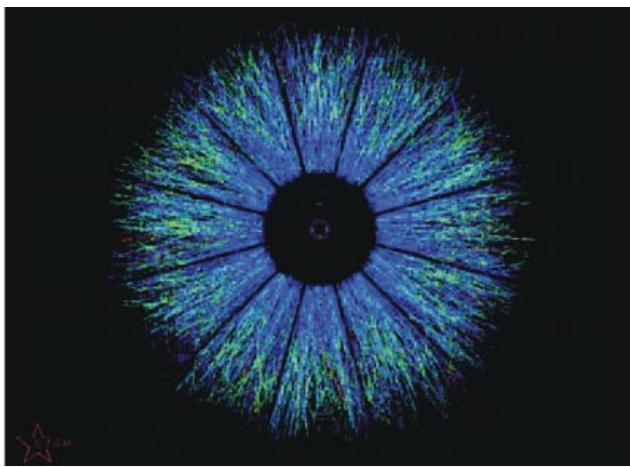


Рис. 7. На рисунке изображены траектории частиц, образовавшихся в результате столкновения двух ионов золота при большой энергии. Появившийся файербол и его последующее расширение воссоздают на относительно малых масштабах и на короткое время физические условия, которые в последний раз реализовывались во время Большого Взрыва. Рисунок любезно предоставлен коллаборацией STAR, Национальная Брукхейвенская лаборатория.

Если мы пытаемся открыть новые законы, обобщающие уже известные, то наилучшей стратегией может быть использование симметрии как проводника. Эта стратегия уже привела физиков к некоторым захватывающим предположениям, о которых, я уверен, вы услышите в будущем! Для любого из них КХД играет важную роль как стимулирующего фактора, так и основного инструмента в выборе и осуществлении новых экспериментальных исследований.

Я собираюсь схематично обсудить одно из таких предположений и кратко затрону три других.

**3.4.1. Теории объединения.** В основе КХД, как и в основе электрослабой теории, лежит калибровочная симметрия. Взятые вместе, эти теории являются мощным инструментом для расчетов удивительного количества явлений. Уже хотя бы по той причине, что эти теории столь точны и успешны, такой способ изложения фундаментальных законов природы должен быть тщательно изучен во всех возможных направлениях. Действительно, само наличие калибровочных симметрий позволяет сделать далеко идущие предположения. Структурная группа  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ , приводимость представления фермионов (т.е. тот факт, что группа симметрии не связывает между собой все фермионы) и специфические значения таких квантовых чисел, как гиперзаряды, приписываемые каждой из известных частиц, — все это наводит на мысль о наличии большей группы симметрии.

Однако вся сложность скрыта в деталях и никто не может гарантировать, что кажущаяся сложной и беспорядочной наблюдаемая картина мира хорошо описывается сравнительно простой математической конструкцией. Но до некоторой степени так оно и есть.

Многое из того, что нам известно о сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях, схематично изображено на рис. 8. КХД объединяет частицы в группы по три ( $SU(3)$ ) в горизонтальном направлении, слабое взаимодействие объединяет частицы в группы по две ( $SU(2)$ ) в вертикальном направлении, а индексы имеют смысл  $U(1)$ -гиперзарядов. Ни взаимодействия, ни частицы не объединены. То есть существует три различных симметрии взаимодействий и пять несвязанных групп частиц (на самом деле их пятнадцать, в силу трехкратного умножения по количеству поколений).

Ситуацию можно улучшить, если расширить симметрию, добавив глюоны, меняющие цвета сильных и слабых взаимодействий. При этом неожиданно получается довольно приятная схема, изображенная на рис. 10.

Тем не менее существует важная проблема. Три разных взаимодействия не объединяются в одно, как того требует расширенная симметрия.

К счастью, асимптотическая свобода позволяет заключить, что константа связи сильного взаимодействия уменьшается при больших энергиях. Для того чтобы ответить на вопрос о наличии полной единой

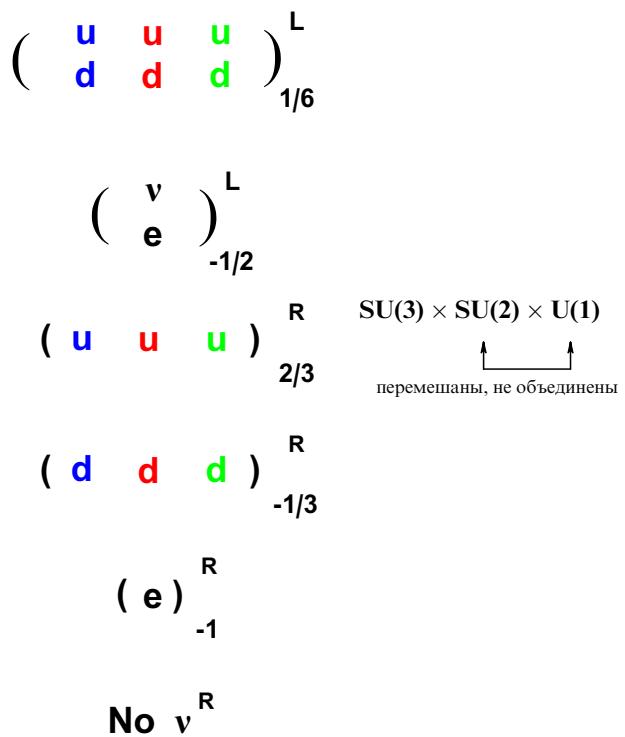


Рис. 8. Схематически представлена структура симметрии Стандартной модели. Существуют три независимых преобразования из групп симметрий, под действием которых фермионы распадаются на пять неприводимых компонент (или пятнадцать с учетом утрояния по количеству поколений). Цветовая группа КХД  $SU(3)$  действует горизонтально, калибровочная группа слабого взаимодействия  $SU(2)$  действует вертикально, а сила действия группы  $U(1)$  определяется значением гиперзаряда, обозначенного нижними индексами. Правое нейтрино не участвует в указанных симметриях.

	<b>R</b>	<b>W</b>	<b>B</b>	<b>G</b>	<b>P</b>
<b>u</b>	+	-	-	+	-
<b>u</b>	-	+	-	+	-
<b>u</b>	-	-	+	+	-
<b>d</b>	+	-	-	-	+
<b>d</b>	-	+	-	-	+
<b>d</b>	-	-	+	-	+
<b>u<sup>c</sup></b>	-	+	+	-	-
<b>u<sup>c</sup></b>	+	-	+	-	-
<b>u<sup>c</sup></b>	+	+	-	-	-
<b>d<sup>c</sup></b>	-	+	+	+	+
<b>d<sup>c</sup></b>	+	-	+	+	+
<b>d<sup>c</sup></b>	+	+	-	+	+
<b>v</b>	+	+	+	+	-
<b>e</b>	+	+	+	-	+
<b>e<sup>c</sup></b>	-	-	-	+	+
<b>N</b>	-	-	-	-	-

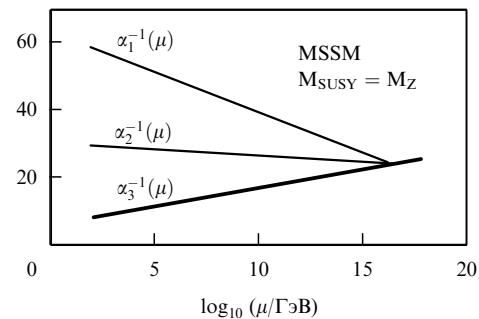
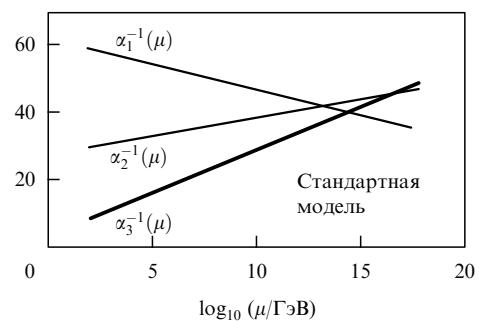
$$\text{Гиперзаряд } Y = -1/6(\mathbf{R} + \mathbf{W} + \mathbf{B}) = 1/4(\mathbf{G} + \mathbf{P})$$

**Рис. 9.** Гипотетическая расширенная симметрия SO(10). Объединение, основанное на SO(10)-симметрии, впервые было описано в работе [10]. Она объединяет все симметрии Стандартной модели в единую структуру. Фермионы, включая и правое нейтрино, играющее важную роль в понимании наблюдаемых данных о нейтрино, в данном случае являются неприводимым множеством (без учета поколений). Разрешенные цветовые заряды как сильного, так и слабого взаимодействий хорошо соответствуют наблюдаемым данным. Гиперзаряд, играющий особую роль в Стандартной модели, теперь вычисляется по цветовым и слабым зарядам в соответствии с приведенной под схемой формулой.

симметрии, необходимо проследить эволюцию констант связи на энергетической шкале. Это можно сделать, используя те же вычисления, что легли в основу рис. 3, с добавлением электрослабых взаимодействий, а затем экстраполировать полученные результаты на очень малые расстояния (или, что то же самое, на большие энергии). Принято изображать обратные константы связи на логарифмической шкале, где зависимости (примерно) линейные. Если проводить вычисления, используя в качестве виртуальных только те частицы, существование которых убедительно доказано, то константы не встретятся в одной точке, хотя в некотором интервале достаточно близко приближаются друг к другу. Это показано на верхнем из графиков рис. 10.

Если смотреть на вещи оптимистично, то можно сказать, что мы близки к успеху, во всяком случае, находимся на правильном пути к реализации теории

Объединение калибровочных взаимодействий



(примерное) соответствие и с гравитацией!

**Рис. 10.** Графики посвящены проверке гипотезы о том, что вследствие взаимодействия с виртуальными частицами существенно различающиеся константы связи калибровочных теорий эволюционируют на малых расстояниях к единому значению [11]. Вычисления аналогичны тем, что лежат в основе рис. 3, но экстраполяция проводится на значительно большие энергии. На верхнем графике показана эволюция констант с учетом известных виртуальных частиц, а на нижнем — с учетом дополнительных виртуальных частиц, возникающих в низкоэнергетической суперсимметрии [12].

объединения. При этом мы также продолжаем верить и в квантовую теорию поля как способ вычисления эволюции констант. Тем более обидно, что экстраполяция констант, экспериментально проверенных до многих порядков уравнений эволюции, приводит к количественному несоответствию. Через некоторое время я упомяну о том, что могло бы оказаться достаточным для этой реализации.

Наиболее общим следствием из проводимой нами линии рассуждений является то, что объединение должно иметь место при огромных энергиях порядка  $10^{15}$  ГэВ или выше. Это утверждение достаточно интересно и даже фундаментально, так как предсказание о физике на высоких энергиях (которые гораздо выше наблюдаемых нами) появилось благодаря тщательному изучению результатов экспериментов в области энергии на 10 или более порядков ниже! При этом средство, которым мы пользовались для достижения цели, состоит из идеи объединения и асимптотической свободы. В силу логарифмической зависимости констант связи от энергетического масштаба равенство констант связи достигается только при очень высоких ее значениях.

Появление в теории объединения большого энергетического масштаба благоприятно, так как многие эффекты при таких энергиях будут подавлены. Симметрии, объединяющие  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ , с неизбежностью включают возможность переходов между кварками, лептонами и их анти搭档ами. Эти дополнительные переходы должны осуществляться соответствующими калибро-

вочными бозонами, нарушающими законы сохранения барионного и лептонного зарядов. Нарушение последнего ассоциируется с нейтринными осцилляциями, а нарушение барионного — с нестабильностью протона. В течение последних лет было установлено существование нейтринных осцилляций. Как следствие, нейтрино обладают ничтожными массами, и ничтожно нарушается закон сохранения лептонного заряда. Несмотря на продолжающиеся героические усилия в этом направлении, нестабильность протона до сих пор не обнаружена. Для того чтобы нарушения указанных законов сохранения были достаточно малы (чтобы согласовываться с экспериментами), в теории объединений весьма уместным опять оказывается большой масштаб. Действительно, переходы, соответствующие нарушениям законов сохранения, будут подавлены при таких энергиях. На самом деле, полученный из эволюции констант связи масштаб объединения достаточно точно соответствует предсказаниям, полученным по наблюденным массам нейтрино, что вдохновляет на дальнейшие усиленные поиски распада протона.

Вторая причина, по которой большой масштаб объединения кажется предпочтительным, заключается в возможности количественно описать эффекты, связанные с последним фундаментальным взаимодействием — гравитацией. Общеизвестно, что гравитационное взаимодействие между частицами на доступных энергиях ничтожно мало по сравнению со всеми остальными. Сила гравитации между электроном и протоном на любом макроскопическом расстоянии составляет  $Gm_e m_p/\alpha \sim 10^{-40}$  от электрической силы. С этой точки зрения требуются серьезные аргументы в пользу возможности объединения этих взаимодействий, и даже еще более серьезные в пользу того, что гравитация, связанная с динамикой пространства-времени, вообще является фундаментальной силой. Такие аргументы появляются как раз на пути изучения эволюции констант связей.

- В то время как эволюция констант калибровочных теорий является тонким квантовым эффектом, гравитационная константа эволюционирует даже на классическом уровне, причем гораздо быстрее. Гравитация ответственна за энергию — импульс и, следовательно, становится сильнее при больших энергиях. При движении от малых энергий до масштаба объединения отношение  $GE^2/\alpha$  вырастает до величины, уже не столь малой, как на доступных энергиях.

- Если гравитация является фундаментальным взаимодействием, то постоянные Ньютона  $G$ , скорость света  $c$  и постоянная Планка  $\hbar$  являются выделенным набором мировых констант. Но если мы измерим массу протона в планковских единицах, то получим

$$m_p \sim 10^{-18} \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}. \quad (3.2)$$

То есть с точки зрения нашей гипотезы бессмысленно задаваться вопросом: "Почему гравитация так слаба?" Если гравитация является фундаментальной, то она является тем, чем является. Более правильный вопрос: "Почему протон такой легкий?" Держа в уме происхождение массы протона, о котором я вам сегодня рассказывал, мы можем дать предположительный ответ. Масса протона устанавливается масштабом, на котором кон-

станта сильного взаимодействия, эволюционирующая от своего исходного значения на планковском масштабе, становится порядка единицы. Это соответствует моменту, когда сильная константа становится достаточной, чтобы цветовые поля夸克 были порядка энергии локализации. Тем самым мы количественно получили, что малая масса протона в планковских единицах является следствием того, что на планковском масштабе сильная константа  $g$  является величиной порядка  $1/2!$  Очевидная слабость гравитации происходит из нашего пристрастного отношения к протонам и нейтронам, из которых состоит материя.

### 3.4.2. Суперсимметрия.

Я уже отмечал, что хотя общая идеология построения теории объединения и предложена, тем не менее точного объединения констант не происходит, если их эволюция рассчитывается на основании известных виртуальных частиц. Один из проектов, предполагающих увеличение мира частиц, причем хорошо мотивированный с разных точек зрения, известен как низкоэнергетическая суперсимметрия<sup>4</sup>.

Как следует из самого названия, суперсимметрия предполагает расширение симметрии физических уравнений. Это расширение, однако, существенно отличается от расширения калибровочной группы, как это имеет место в случае теории объединения. Суперсимметрия порождает переходы между частицами с одинаковыми цветовыми зарядами, но разными спинами, в то время как расширенная калибровочная группа меняет цветовые заряды, оставляя спин нетронутым. Другими словами, суперсимметрия расширяет пространственно-временную симметрию специальной теории относительности.

Для того чтобы претворить в жизнь низкоэнергетическую суперсимметрию, мы должны допустить существование целого нового мира тяжелых частиц, ни одна из которых до сих пор не была открыта. Косвенный намек на то, что такой сценарий может оказаться реальностью, заключается в том, что вычисление эволюции констант с учетом новых виртуальных частиц позволяет достичь точного объединения! Это демонстрируется на нижнем графике рис. 10.

Возводя башню из рассуждений, включающих в себя расширение как калибровочной, так и пространственно-временной симметрий, мы словно прорываемся через облака к ясной и захватывающей панораме окружающего мира. Реальность это или иллюзия? Ответ на этот вопрос будет самым интригующим в работе нового большого адронного коллайдера (LHC), который начнет функционировать в 2007 г. в ЦЕРНе и мощности которого может хватить для открытия нового мира частиц. Как будет развиваться эта история, покажет только время. Но в любом случае следует отметить, что теории объединения, которые в прошлых (и многих настоящих) воплощениях казались туманными и непригодными для проверки, в кругу описанных мною идей достигли совершенно нового уровня конкретности.

### 3.4.3. Аксионы<sup>5</sup>.

Как я уже неоднократно отмечал, КХД в фундаментальном смысле и даже буквально является воплощением симметрии. Существует почти точное соответствие между наблюдаемыми свойствами квар-

<sup>4</sup> См. стандартный обзор [13].

<sup>5</sup> См. стандартный обзор [14]. Я также рекомендую [15].

ков и глюонов и самыми общими свойствами, разрешенными цветовой калибровочной симметрией в рамках специальной теории относительности и квантовой механики. Исключение составляет тот факт, что симметрии КХД не запрещают одно явление, которое не наблюдается. Установленные симметрии разрешают специальное взаимодействие между глюонами, так называемый  $\theta$ -член, который нарушает инвариантность уравнений КХД относительно изменения направления времени. Эксперименты установили очень жесткие пределы для силы этого взаимодействия, причем гораздо более жесткие, чем можно было ожидать.

Постулируя новую симметрию, мы можем объяснить отсутствие нежелательного взаимодействия. Эта симметрия называется симметрией Печеи–Куинна по именам физиков, впервые ее предложивших. Если такая симметрия существует, то имеются примечательные следствия. Она предсказывает существование новых очень легких и слабовзаимодействующих частиц — аксионов. (Я назвал их в честь моющего средства, поскольку они расчистили проблему с аксиальными токами.) В принципе, аксионы могли бы быть обнаружены многими способами, хотя ни один из них нельзя назвать простым. Они имеют интересные приложения в космологии и являются возможными кандидатами на объяснение состава темной материи.

**3.4.4. В поисках потери симметрии<sup>6</sup>.** Прошло уже четыре десятилетия с тех пор, как была сформулирована замечательная и успешная теория электрослабых взаимодействий. Центральным в этой теории было наличие механизма спонтанного нарушения симметрии. Согласно этой концепции фундаментальные физические уравнения обладают большей симметрией, чем реальный физический мир. Несмотря на то, что специфическое использование этого механизма в электрослабой теории использует гипотетическое вещество и непростую математику, основополагающая идея довольно стара. В некотором смысле она восходит к истокам современной физики, когда Ньютона постулировал изотропность пространства, несмотря на то, что ежедневный опыт ясно отличал низ и верх от горизонтальных направлений. Ньютона, конечно, приписал эту асимметрию наличию гравитации. В рамках теории электрослабых взаимодействий современные физики аналогичным образом постулировали, что физический мир описывается решением, где во всем пространстве наблюдаемой Вселенной существует одно (или более) квантовое поле, нарушающее полную симметрию исходных уравнений.

К счастью, эта гипотеза имеет проверяемые приложения. Нарушающие симметрию поля, при должном возбуждении, рождают частицы — их квантты. Используя наиболее экономный механизм нарушения симметрии, мы получим примечательную новую частицу — бозон Хиггса. Более амбициозные рассуждения предполагают наличие целого набора таких частиц. Низкоэнергетическая суперсимметрия, например, требует наличия, как минимум, пяти частиц Хиггса.

Поиск хиггсовских частиц станет еще одной важной задачей для исследований на установке LHC. КХД и асимптотическая свобода также будут играть важную

роль. Сильное взаимодействие будет ответственно за большую часть того, что произойдет во время экспериментов на установке LHC. Для того чтобы разглядеть новый эффект, происходящий в малой доле всех событий, мы должны хорошо понимать состав фона. Рождение и распад частиц Хиггса обычно происходят с испусканием кварков и глюонов. Для того чтобы распознать их след и, в конечном итоге, интерпретировать наблюдения, мы должны использовать наше понимание того, как сталкивающиеся на установке LHC протоны собраны из кварков и глюонов, и понимать, что кварки и глюоны ведут себя в эксперименте как струи.

## 4. Главный урок

Помимо разрешения парадоксов, с которых мы начали, асимптотическая свобода привела к открытию нескольких фундаментальных свойств природы и создала универсальные подходы для дальнейших исследований.

Главный урок, тем не менее, скорее философский. Вызывает почтение тот факт, что мы, люди, способны постигать самые глубокие принципы природы, даже если они упрытаны в далекой от земной действительности. Наши умы не были созданы для этого, равно как и нужных инструментов не было у нас под рукой. Понимание было достигнуто благодаря значительным международным усилиям тысяч людей, работавших в течение десятилетий, конкурирующих в малом и объединявших усилия ради главного, постоянно соблюдавших правила открытости и честности. Только благодаря такому подходу, который был достигнут не без усилий и требовал терпения, мы можем творить чудеса.

## 5. Эпилог

Это было заключением моей лекции. В этой печатной версии мне хотелось бы добавить некоторые впечатления о моих друзьях и коллегах.

**Благодарности.** В первую очередь я хочу поблагодарить своих родителей, которые заботились обо мне и поощряли мое любопытство. Они были детьми эмигрантов из Польши и Италии и выросли в трудных условиях великой депрессии, но несмотря на все тяготы жизни оставались великодушными людьми и вдохновляли на учение и занятие наукой. Я благодарен людям, поддерживавшим в Нью-Йорке систему общественных школ, которой я очень признателен. Я также получил превосходное образование в университете Чикаго. В этой связи мне бы хотелось особо отметить вдохновляющее влияние Питера Фройнда, огромный энтузиазм которого и замечательное изложение физического курса по теории групп были решающими в моем выборе между физикой и чистой математикой.

Далее я хочу поблагодарить людей, окружавших меня в Принстоне в 1970-х годах и создавших условия для развития и работы. С точки зрения личной жизни это относится к моей жене Бетси Девайн. Полагаю, что совпадение начала моей научной зрелости и прилива жизненных сил с моментом, когда я влюбился в нее, неслучайно. Хочу также отметить моих студентов Роберта Шрока и Билла Кезвелла, у которых я многому научился и благодаря которым наша интенсивная работа

<sup>6</sup> Более подробно на эту тему см. [16].

казалась чем-то естественным и даже веселым. С научной точки зрения более чем всем остальным, я обязан Дэвиду Гроссу. Он заразил меня своим способом познания, а его руководство и личный пример вдохновляли меня в течение всей карьеры. Атмосфера в Принстоне 1970-х годов была превосходной для занятий теоретической физикой. Она стимулировала страстное желание разобраться в той или иной проблеме, воспитывала интеллектуальную твердость и уверенность в себе. Во многом она сложилась благодаря Мэрфи Гольдбергеру, Сэму Трейману и Кертису Каллану. Также Сидни Коулмен часто приезжал в Принстон и интересовался нашей работой. Интерес к физике, который он демонстрировал, был уникален и вдохновлял сам по себе. Сидни задавал много вопросов, помогающих нам ухватиться за результат. Несколько ранее нас посещал с лекциями Кен Вильсон, и его идеи о ренормализационной группе постоянно крутились у нас в головах.

Понимание фундаментальных свойств сильных взаимодействий пришло в результате исследований, проводимых тысячами талантливых людей. Я хочу отдельно поблагодарить моих коллег физиков. Мои теоретические изыскания основывались на изобретательности и упорстве коллег экспериментаторов. Спасибо всем им. Помимо общих благодарностей мне хочется особо отметить трио физиков, работы которых имели для нас большое значение и которые (пока?) не получили Нобелевской премии. Я имею в виду Йоширо Намбу, Стивена Адлера и Джеймса Бьеркена. Эти ученые положили начало серьезным исследованиям адронной физики в рамках концепции квантовой теории поля и воплотили свои труды в специальные модели в то время, когда заниматься этими задачами было трудно и не модно. Я благодарен Мюррею Гелл-Ману и Герарду 'т Хофтту за то, что они не открыли все, что можно открыть, и кое-что оставили нам. И, наконец, я благодарен самой природе за удивительно хороший вкус, благодаря которому нам удалось открыть столь красивую теорию.

Эта работа была выполнена при поддержке Департамента США по энергетике (D.O.E.) по соглашению DE-FC02-94ER40818.

**Замечания для историков.** Я не привожу здесь обширного рассказа о моем личном опыте открытия. Я полагаю, что такие рассказы, скорректированные уже после свершившегося, не заслуживают доверия. Я бы посоветовал историкам науки фокусировать внимание не на современных документах, а скорее на оригинальных работах, которые, по определению, наилучшим образом отражают степень понимания в тот или иной момент времени. На основе этой литературы несложно определить момент, когда был пройден водораздел в том направлении, о котором я ранее говорил, когда знаменные парадоксы сильных взаимодействий и квантовой теории поля нашли свое разрешение в современных парадигмах нашего понимания Природы.

Перевел с англ. А.В. Зотов  
Научный редактор перевода А.С. Горский

### Список литературы

1. Gross D J, Wilczek F *Phys. Rev. Lett.* **30** 1343 (1973)
2. Gross D J, Wilczek F *Phys. Rev. D* **8** 3633 (1973)
3. Gross D J, Wilczek F *Phys. Rev. D* **9** 980 (1974)
4. Landau L D, in *Niels Bohr and the Development of Physics; Essays Dedicated to Niels Bohr on the Occasion of His Seventieth Birthday* (Ed. W Pauli) (New York: McGraw-Hill, 1955) p. 52
5. Yang C N, Mills R L *Phys. Rev.* **96** 191 (1954)
6. Nambu Y, in *Preludes in Theoretical Physics, in Honor of V.F. Wesskopf* (Eds A de-Shalit, H Feshbach, L van Hove) (Amsterdam: North-Holland, 1966)
7. Bethke S *Nucl. Phys. B: Proc. Suppl.* **121** 74 (2003); hep-ex/0211012
8. Leinweber D B, <http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/Nobel>
9. Kilcup G W, <http://www.physics.ohio-state.edu/~kilcup>
10. Georgi H, in *Particles and Fields — 1974* (Ed. C Carlson) (New York: AIP, 1975)
11. Georgi H, Quinn H R, Weinberg S *Phys. Rev. Lett.* **33** 451 (1974)
12. Dimopoulos S, Raby S, Wilczek F *Phys. Rev. D* **24** 1681 (1981)
13. Nilles H P *Phys. Rep.* **110** 1 (1984)
14. Kim J E *Phys. Rep.* **150** 1 (1987)
15. Wilczek F, hep-ph/0408167
16. Wilczek F *Nature* **433** 239 (2005)