

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 1999

Противостояние с бесконечностью

Г. 'т Хофт

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 1999 г.)

PACS numbers: 11.10.Gh, 11.15.-q, 12.15.-y, 12.38.-t

Содержание

1. Начнем с закуски (1218).
  2. Введение (1218).
  3. Ренормализационная группа (1219).
  4. Стандартная модель (1221).
  5. Будущие ускорители (1222).
  6. За пределами Стандартной модели (1223).
- Список литературы (1224).

1. Начнем с закуски

Первоначальные усилия по построению реалистических моделей слабых взаимодействий оказались бесплодными, так как при вычислении радиационных поправок возникали бесконечные, а потому бессмысленные, выражения. Когда была открыта перенормируемость моделей, основанных на калибровочных теориях и механизме Хиггса, надоедливые бесконечности исчезли — они сократились. Поскольку это достижение выглядит как результат математического колдовства, возможно, стоит рассмотреть физические принципы, на которых оно в действительности основано.

2. Введение

Находиться здесь и выступать с подобной лекцией — наивысшая честь, доступная ученому, работающему в моей области. Трудно передать, как я благодарен не только Нобелевскому комитету и Шведской Королевской академии наук, но и многочисленным друзьям и коллегам физикам, которые сочли нашу работу достойной того, чтобы выдвинуть ее на эту премию. В этой лекции я хочу поразмышлять о тех усилиях, которые потребовались для "укрощения" калибровочных теорий, о причинах сопутствовавшего нам успеха и о тех уроках, которые следует усвоить. Я осознаю опасность подобного предприятия. В прошлом нередко удавалось

добиться прогресса именно потому, что предшествовавшие уроки отвергались. Хотя это, возможно, и так, я, тем не менее, считаю, что эти уроки имеют большое значение, и если исследователи будущего решат их игнорировать, они должны по крайней мере осознавать, что делают.

Когда я начал заниматься физикой элементарных частиц, не существовало никакой точной теории слабых взаимодействий [1]. Как известно, любая теория, которую пытались написать, оказывалась перенормируемой. Что это означает? Фактически это значит, что при вычислении поправок к амплитудам рассеяния возникают физически недопустимые выражения. Из результатов вычислений следовало, что эти амплитуды должны быть бесконечными. Как правило, возникали интегралы вида

$$\int d^4k \frac{\text{Pol}(k_\mu)}{(k^2 + m^2)[(k+q)^2 + m^2]} = \infty, \quad (2.1)$$

где  $\text{Pol}(k_\mu)$  — некоторый многочлен от переменных интегрирования  $k_\mu$ . С физической точки зрения это бессмыслица. Когда независимо от используемой модели в расчете получается, что влияние некоторого малопонятного второстепенного явления оказывается бесконечно большим, известно, что это значит: так называемый второстепенный эффект вовсе не является столь безобидным, каким он, возможно, казался — скорее всего, он некорректно учтен в данной модели, и следует доработать модель, уделяя особое внимание тем ее сторонам, которые сначала казались несущественными. Бесконечности в теориях слабого взаимодействия возникали из-за взаимодействия с виртуальными частицами при чрезвычайно высоких энергиях. Высокие энергии означают также большие импульсы, а в квантовой механике это значит, что связанные с этими частицами волны имеют очень малую длину. Отсюда следует, что структура существовавших тогда теорий на малых расстояниях была неясна.

Малые масштабы расстояний и короткие временные интервалы впервые появились в физике, когда Ньютон и Лейбниц ввели понятие дифференцирования. При описании движения планет и их спутников приходится рассматривать малый временной интервал  $\Delta t$  и смещение

Г. 'т Хофт (G. 't Hooft). Institute for Theoretical Physics, University of Utrecht, Princetonplein 5, 3584 CC Utrecht, the Netherlands  
E-mail: g.thoof@fys.ruu.nl

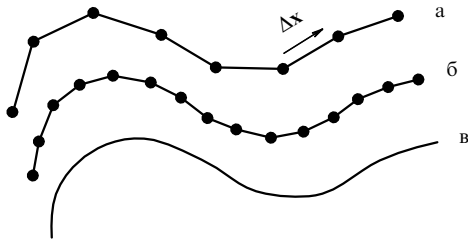


Рис. 1. Дифференцирование.

объекта  $\Delta x$  за этот промежуток времени (рис. 1а). Ключевое утверждение состояло в том, что в пределе  $\Delta t \rightarrow 0$  отношение

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v \quad (2.2)$$

имеет смысл, и его называют "скоростью". На самом деле можно еще раз взять отношение *изменения* скорости  $\Delta v$  за этот малый промежуток времени к  $\Delta t$ , и, как и раньше, отношение

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a \quad (2.3)$$

существует в пределе  $\Delta t \rightarrow 0$ ; его называют "ускорением". Их великое открытие состояло в том, что надо написать уравнения, связывающие ускорения, скорости и положения, и что в пределе, когда  $\Delta t$  стремится к нулю, возникают хорошие модели для описания движения небесных тел (рис. 1в). Выросший отсюда раздел математики, изучающий дифференциальные уравнения, является теперь неотъемлемой частью аппарата теоретической физики, и мы часто не осознаем, сколь важными и нетривиальными были в действительности эти утверждения. В современных физических теориях расстояния и интервалы времени постоянно устремляются к нулю, в том числе и в теориях поля в большом числе размерностей, предполагая, что основные принципы дифференциальных уравнений применимы и к ним. Однако время от времени случается, что все оказывается неправильным: пределы, которые представлялись нам хорошо знакомыми, по-видимому, не существуют. Тогда приходится пересматривать свойства модели при самых малых временах и расстояниях.

Бесконечные интегралы не были новостью в теории частиц. Они и ранее неоднократно встречались, и в некоторых теориях было понятно, как с ними следует поступать [2]. Требуемая процедура называется "перенормировкой". Представим себе частицу, например, электрон в виде маленькой сферы радиуса  $R$  и массы  $m_{\text{гол}}$ . Затем снабдим ее электрическим зарядом величины  $Q$ . Энергия электрического поля дается при этом выражением

$$U = \frac{Q^2}{8\pi R} \quad (2.4)$$

и, согласно специальной теории относительности Эйнштейна, соответствует дополнительной массе, равной  $U/c^2$ , где  $c$  — скорость света. Система частица + поле будет иметь массу, равную

$$m_{\text{физ}} = m_{\text{гол}} + \frac{Q^2}{8\pi c^2 R}. \quad (2.5)$$

Именно эту массу, называемую "физической массой", измерил бы экспериментатор, если бы частица подчинялась закону Ньютона  $F = m_{\text{физ}} a$ . Настораживающее обстоятельство состоит здесь в том, что поправка к массе стремится к бесконечности, когда радиус нашей частицы  $R$  устремляется к нулю. Однако нам необходимо, чтобы  $R$  было равно нулю. Если бы  $R$  было конечным, то трудно было бы учесть то обстоятельство, что *силы*, действующие на частицу, должны передаваться со скоростью, меньшей скорости света, как того требует специальная теория относительности Эйнштейна. Если бы частица поддавалась деформации, она не была бы истинно элементарной. Поэтому частицы конечных размеров не могут служить хорошей основой для теории элементарных объектов.

Кроме того, имеет место эффект, приводящий к изменению электрического заряда частицы. Этот эффект называется "поляризацией вакуума". Во время чрезвычайно коротких временных интервалов квантовые флуктуации вызывают рождение и последующее уничтожение пар частица – античастица. Если эти частицы несут электрические заряды, то те из них, заряды которых противоположны по знаку заряду нашей частицы, стремятся двигаться по направлению к ней и таким образом нейтрализовать ее. Хотя этот эффект обычно весьма мал, имеется тенденция к тому, чтобы вакуум "экранировал" заряд рассматриваемой частицы. В результате этого экранирующего эффекта частица с зарядом  $Q_{\text{гол}}$  при наблюдении с некоторого расстояния выглядит как частица с меньшим зарядом  $Q_{\text{физ}}$ . Связь между  $Q_{\text{гол}}$  и  $Q_{\text{физ}}$  опять же зависит от  $R$ , и, как и в случае с массой частицы, перенормировка заряда стремится к бесконечности, когда радиус  $R$  устремляется к нулю (хотя при конечных  $R$  этот эффект, как правило, достаточно мал).

Уже в первой половине XX столетия физики осознали следующее. *Единственными* свойствами частицы, например, электрона, которые мы вообще можем измерить в эксперименте, являются физическая масса  $m_{\text{физ}}$  и физический заряд  $Q_{\text{физ}}$ . Таким образом, процедура, которую следует применить, состоит во взятии предела при  $R$ , стремящемся к бесконечности и остающимися постоянными  $m_{\text{физ}}$  и  $Q_{\text{физ}}$ . Все, что происходит с *голой* массой  $m_{\text{гол}}$  и *голым* зарядом  $Q_{\text{гол}}$  в этом пределе, не имеет значения, поскольку эти величины в принципе не могут быть непосредственно измерены.

Разумеется, такое рассуждение содержит в себе некую опасность. Если в уравнении (2.5) устремить  $R$  к нулю, одновременно удерживая фиксированной  $m_{\text{физ}}$ , то мы увидим, что  $m_{\text{гол}}$  стремится к *минус* бесконечности. Могут ли теории, в которых частицы имеют отрицательную массу, оказаться, тем не менее, стабильными? Ответ отрицательный, однако в проквантованной теории, к счастью, уравнение (2.5) заменяется другим уравнением. Масса  $m_{\text{гол}}$  стремится к нулю, а не к минус бесконечности.

### 3. Ренормализационная группа

Современный способ рассмотрения структуры на малых расстояниях состоит в том, чтобы выполнить *масштабные преобразования* с использованием *ренормализационной группы* [3]. Это можно проиллюстрировать, опять рассматривая уравнения движения планет. Предположим, что мы выбрали некоторый временной интервал

$\Delta t$  и ищем уравнения для смещений  $\Delta x$ . Пусть мы хотим очень точно взять предел  $\Delta t \rightarrow 0$ . Можно, например, сначала разделить все интервалы  $\Delta t$  и  $\Delta x$  на 2 (рис. 1б). При этом мы заметим, что если исходные интервалы уже достаточно малы, новые результаты вычислений будут очень близки к предыдущим. Это происходит потому, что за короткие промежутки времени планеты и их спутники проходят лишь небольшие отрезки своих орбит, которые *очень близки к прямым линиям*. Если бы они двигались точно по прямым линиям, деление на 2 вообще не привело бы ни к каким отличиям. Планеты движутся по прямым линиям, только если на них *не действуют силы*. Дифференциальные уравнения вообще столь хорошо применимы к планетам потому, что *можно игнорировать влияние сил* ("взаимодействий"), если временные и пространственные интервалы взяты достаточно малыми.

Мы научились делать то же самое в теориях квантованных полей, описывающих элементарные частицы. Рассмотрим снова систему взаимодействующих частиц на очень коротких временных и пространственных масштабах. Если на достаточно малых масштабах взаимодействиями между частицами можно пренебречь, то понятно, как брать пределы, когда все эти масштабы доходят до самого нуля. Взаимодействиями тогда можно пренебречь, все частицы на этих масштабах движутся без возмущений, и физика нам ясна. Подобные теории могут иметь доброкачественную математическую основу: понятно, как провести вычисления путем аппроксимации пространства и времени, деля их на конечные интервалы и переходя в конце к пределу.

Так какова же ситуация в этом случае? Исчезают ли взаимодействия между элементарными частицами на достаточно малых масштабах? Здесь нас подстерегает неожиданность, с которой физикам пришлось бороться: они не исчезают.

В самом деле, многие теории очень плохо "ведут себя" на малых расстояниях. Простым прототипом таких теорий является так называемая *королевская модель* [4]. В этой модели вводится многокомпонентное скалярное поле, подчиняющееся условию, что его полная длина фиксирована:

$$\sum_i |\phi_i|^2 = R^2 = \text{fixed}. \quad (3.1)$$

На больших пространственных масштабах влияние этого условия мало, поскольку квантовые флуктуации малы по сравнению с  $R$ . Но на малых расстояниях квантовые флуктуации велики по сравнению с  $R$ , а потому вышеприведенное условие вызывает более существенный эффект. В результате в подобной теории имеются сильные взаимодействия на малых расстояниях, и наоборот. Поэтому на бесконечно малых пространственных масштабах такая теория плохо определена, и модель оказывается неподходящей для правильного описания элементарных частиц. Другие примеры моделей с "плохим поведением" на малых расстояниях — это старая четырехфермионная модель слабых взаимодействий, а также большая часть всех попыток построения квантового варианта эйнштейновской теории гравитации.

Однако некоторые специально разработанные модели не столь плохи. Примерами являются модель

беспиновых частиц, поля которых  $\phi$  взаимодействуют только посредством члена  $\lambda\phi^4$  в лагранжиане, и модель, в которой заряженные частицы взаимодействуют через уравнения Максвелла (квантовая электродинамика, КЭД). В общем случае в качестве пространственного масштаба выберем параметр  $1/\mu$ . Масштабное преобразование с множителем 2 сводится к добавлению  $\ln 2$  к  $\ln \mu$ , и если масштаб расстояния равен  $\Delta x$ , то

$$\mu \frac{d}{d\mu} \Delta x = -\Delta x. \quad (3.2)$$

В течение 60-х годов было установлено, что во *всех* существовавших в то время теориях вариация в зависимости от  $\mu$  их параметров взаимодействия (коэффициента  $\lambda$  в теории  $\lambda\phi^4$  или коэффициента  $e^2$  в квантовой электродинамике электронов с зарядом  $e$ ) дается положительной функцией [5], называемой  $\beta$ -функцией:

$$\mu \frac{d}{d\mu} \lambda = \beta(\lambda) > 0. \quad (3.3)$$

Сравнивая (3.3) с (3.2), видим, что  $\lambda$  возрастает при уменьшении  $\Delta x$ .

В упомянутых выше весьма специальных моделях функция  $\beta(\lambda)$  при малых  $\lambda$  ведет себя как  $\lambda^2$  и является столь малой величиной, что взаимодействие только незначительно изменяется при переходе от одного масштаба к другому. Это означает, что, хотя взаимодействия по-прежнему имеют место (независимо от того, сколь малые масштабы мы рассматриваем), они не очень опасны, в силу чего такие теории являются "перенормируемыми". Если воспользоваться теорией возмущений при малых  $\lambda$ , то при вычислении одного члена за другим все коэффициенты разложения будут однозначно определены, и мы можем поддаться искушению поверить, что в этих теориях нет никаких серьезных проблем.

Тем не менее многие специалисты в подобных вопросах были весьма озабочены, и на то имелась серьезная причина: если  $\beta$  положительна, то найдется масштаб, на котором сила взаимодействия между частицами расходится. Решение уравнения (3.3) имеет вид (рис. 2а)

$$\lambda(\mu) = 1/(C - \beta_2 \ln \mu), \quad \text{если} \quad \beta(\lambda) = \beta_2 \lambda^2, \quad (3.4)$$

где  $C$  — постоянная интегрирования, причем  $C = 1/\lambda(1)$ , если  $\lambda(1)$  есть  $\lambda$ , измеренная на масштабе  $\mu = 1$ . Видно, что на масштабах  $\mu = O[\exp(1/\beta_2 \lambda(1))]$  взаимодействие становится необычайно большим. Поскольку при малых  $\lambda(1)$  до этого экспоненциально далеко, эта проблема незаметна в пертурбативной формулировке теории,

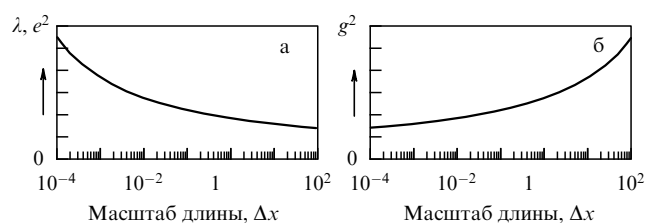


Рис. 2. Масштабное преобразование величины взаимодействия при изменении масштаба длины: для теорий  $\lambda\phi^4$  и КЭД (а); для теорий Янга – Миллса (б).

однако понятно, что если  $\lambda$  берется не очень малой (как в физически реалистических теориях), то возникают реальные затруднения на некотором конечном масштабе. И поэтому не таким уж безумным был вывод о том, что эти квантовые теории поля негодны и что следует искать другие методы для описания теорий частиц.

Меня эти проблемы никогда не тревожили по одной простой причине. Еще в 1971 году я сам провел вычисления масштабных свойств теорий поля, и первой теорией, которую я рассмотрел, была теория Янга–Миллса. Мои результаты показывали, что в этих теориях, используя современные обозначения, мы имеем

$$\beta(g^2) = Cg^4 + O(g^6), \quad \text{где } C < 0, \quad (3.5)$$

если число видов фермионов меньше 11 (для SU(2)) или  $16\frac{1}{2}$  (для SU(3)). Это вычисление, о котором упоминается в моей первой статье по массивной теории Янга–Миллса [6], было весьма тонким с технической стороны, но концептуально не слишком сложным. Я и представить себе не мог, каким сокровищем я обладал, и не подозревал о том, что никто из специалистов не знал, что  $\beta$  может быть отрицательной; дело в том, что они неизменно ограничивались изучением только скалярных теорий поля и квантовой электродинамики.

#### 4. Стандартная модель

Поскольку мы намеревались противостоять бесконечностям в вычислениях процессов, связанных со слабыми взаимодействиями, перед нами вставала задача указать такую модель слабых взаимодействий, которая будет правильно сплетаться с электромагнитными силами на масштабах больших расстояний, но при этом окажется достаточно слабо взаимодействующей на малых расстояниях. Решение проблемы состояло в том, чтобы использовать спонтанное нарушение симметрии<sup>1</sup>. Вводится поле с четверным самодействием, но с отрицательным массовым членом, так что его энергетически выгодное значение не равно нулю. Тот факт, что такие поля можно использовать для генерации массивных векторных частиц, был известен в литературе, но широко не применялся. Известно было также и то, что подобным образом можно строить разумные модели слабых взаимодействий. Эти модели, однако, считались неэлегантными, и тот факт, что они давали единственное решение нашей задачи, не осознавался.

Возвращенные недавно к жизни модели предсказывают не только ранее неизвестные каналы для слабых взаимодействий, но еще и новую скалярную частицу — бозон Хиггса [8]. Новое слабое взаимодействие, так называемое взаимодействие нейтральных токов, удалось подтвердить экспериментально в течение нескольких лет, но на момент написания этого текста хиггсовский бозон все еще ускользает от нас. Некоторые исследователи подозревают, что он вообще не существует. Если бы это было так, то это означало бы

отождествление хиггсовского поля с киральным полем — полем с фиксированной длиной. Можно также сказать, что это соответствует предельному случаю, когда масса "хиггса" устремляется к бесконечности. Частицу с бесконечной массой нельзя породить, так что можно считать, что ее нет. Но как мы объяснили ранее, киральные теории "плохо ведут себя" на малых расстояниях. Можно также сказать, что сила взаимодействия на малых расстояниях пропорциональна массе "хиггса"; если предположить, что она бесконечна, то мы окажемся в ситуации, когда поведение на малых расстояниях неконтролируемо. Такие модели просто не работают. Возможно, экспериментаторы не преуспеют в получении и детектировании частиц Хиггса, но это будет означать, что для описания структуры малых расстояний потребуются совершенно новые теории. Уже были предложены такие возможные теории. В настоящее время они кажутся неэлегантными, но кто знает, быть может это связано только с ограниченностью нашего нынешнего понимания? Из новых теорий с необходимостью следовало бы существование многих неизвестных в настоящее время видов частиц, и экспериментаторы были бы рады обнаружить и изучить такие объекты. Здесь нельзя допустить провала. Либо частица Хиггса, либо другие частицы, должно быть, ожидают своего открытия, вероятно, в ближайшем будущем [9].

К сильным взаимодействиям применима та же философия, но итог рассуждений совершенно иной. Хорошее масштабное поведение чистых калибровочных теорий (рис. 2б) позволяет построить модель, в которой взаимодействия на больших расстояниях определенно являются сильными, но убывают (хотя и только логарифмически) до нуля на малых расстояниях. Такая теория может описывать силы, связывающие кварки друг с другом. Было обнаружено, что эти силы стремятся к постоянной величине на произвольно больших расстояниях, там, где кулоновские силы убывали бы по закону обратных квадратов. Квантовая хромодинамика, т.е. теория Янга–Миллса с калибровочной группой SU(3), может поэтому использоваться как теория сильных взаимодействий. Это единственная допустимая модель, в которой сила взаимодействия велика, но структура малых расстояний тем не менее контролируема.

Слабое взаимодействие, наоборот, убывает экспоненциально, когда расстояние между взаимодействующими слабым образом объектами становится большим. Таким образом, калибровочная теория позволяет построить модели с физически приемлемым поведением на малых расстояниях, тогда как силы на больших расстояниях могут изменяться одним из следующих трех различных способов:

(а) Сила может убывать экспоненциально быстро, как в случае слабых взаимодействий.

(б) Сила может убывать по закону обратных квадратов, как в электромагнетизме.

(в) Сила может стремиться к постоянной величине, как в теории сильных взаимодействий.

*Стандартная модель* (рис. 3) представляет собой наиболее точную модель, описывающую природу в том виде, как мы знаем ее сегодня. Она построена в строгом соответствии с описанными выше правилами. Основной принцип всегда состоит в том, что экспериментально получаемая информация об элементарных частицах относится к их поведению на больших рас-

<sup>1</sup> Рассматриваемый здесь механизм генерации массы не следует, строго говоря, рассматривать как спонтанное нарушение симметрии, поскольку в этих теориях вакуум не нарушает калибровочную симметрию. "Скрытая симметрия" будет более подходящим выражением [7]. Будем называть этот механизм просто "механизмом Хиггса". (Примеч. авт.)

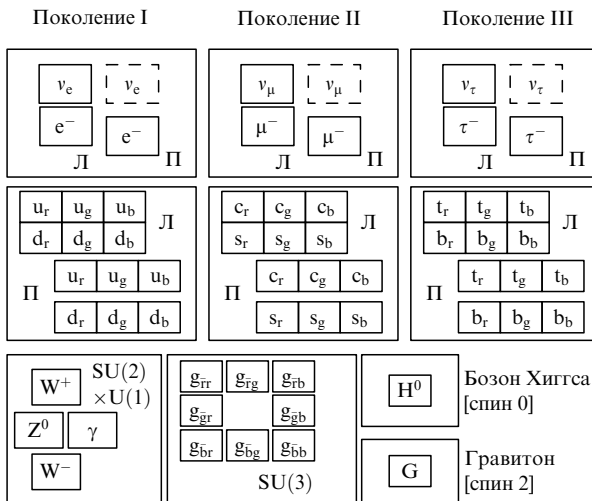


Рис. 3. Стандартная модель.

стояниях. Относительно же структуры теории на малых расстояниях постулируется, что она должна быть настолько регулярной, насколько это возможно без нарушения таких принципов, как строгое выполнение причинности и лоренцева инвариантность. Такие модели не только позволяют точно вычислить следующие из них результаты, но и, по-видимому, правильно описывают, как устроена природа. В некотором смысле это скорее всего слишком хорошо, чтобы быть правдой. Ниже мы кратко объясним причины, побуждающие нас предполагать существование многих сортов частиц и сил, которые не включены пока в Стандартную модель, а также подозревать, что структура Стандартной модели на малых расстояниях и в самом деле требует модификации.

## 5. Будущие ускорители

Самое сильное желание теоретиков — вывести все, что они хотят знать о структурах на малых расстояниях, используя только чистую мысль и фундаментальные принципы. К сожалению, наше нынешнее понимание основ абсолютно недостаточно, и все, что у нас есть — это некие сделанные наугад предположения. Разумеется, будущее этой области по-прежнему в значительной степени зависит от открытий, которые будут сделаны в новых экспериментах.

Нынешние эксперименты на Большом электрон-позитронном коллайдере (LEP) в ЦЕРНе близки к завершению. Эти высокоточные измерения дали впечатляющие результаты, которые не только прекрасно подтвердили Стандартную модель, но и позволили осуществить экстраполяцию на более высокие энергии. Это означает, что нам предоставлена возможность получить некоторое представление о структурах на наименьших доступных на сегодня расстояниях. Наиболее замечательный результат состоит в том, что эти структуры, по-видимому, являются гладкими; новые взаимодействия не обнаружены, а это значит, что масса частицы Хиггса не столь уж велика — долгожданный стимул для дальнейших экспериментов по обнаружению этой частицы.

В ближайшем будущем можно ожидать новых интересных экспериментальных результатов, во-первых, от тэватронного коллайдера в Фермилаб близ Чикаго, а также от Большого адронного коллайдера (LHC) в ЦЕРНе. На обоих ускорителях будет проводиться большая работа по обнаружению все еще ускользающей от нас частицы Хиггса. Кто будет первым, зависит от того, какой окажется масса частицы Хиггса, а также другие, пока не вполне известные ее свойства. Подробный анализ имеющихся данных показывает, что с большой вероятностью хиггс будет впервые зарегистрирован в Фермилаб, а в LHC почти наверняка не только обнаружат эти частицы, но и проведут высокоточные измерения многих свойств, например, массы. Если существуют суперсимметричные частицы, то в LHC также, скорее всего, смогут зарегистрировать их в будущих экспериментах, которые планируется начать вскоре после 2005 г.

Однако эти установки, которые дадут возможность разрешать структуры, ранее недоступные для наблюдения, тоже имеют свои пределы. Они не позволяют пересечь ту границу, где теории становятся особенно интересными и возникает сильное желание двигаться дальше. Как и прежде, возможные варианты — это или использование адронов, например, протонов, сталкивающихся с антипротонами, здесь преимущество является то, что из-за их большой массы можно достичь более высоких энергий, или же, в качестве альтернативы, использование лептонов, например,  $e^+$ , сталкивающихся с  $e^-$ , что имеет свои преимущества, поскольку эти объекты в большей степени точечные и сигналы от них больше подходят для экспериментов высокой точности [10]. Конечно, следует делать и то, и другое. Более амбициозный план заключается в том, чтобы сталкивать мюоны,  $\mu^+$  с  $\mu^-$ , поскольку они являются лептонами с большими массами, однако при этом придется преодолевать множество технических препятствий. Для достижения постоянно возрастающего уровня энергий необходимо, чтобы такие установки были очень большими. В частности, будет трудно заставить электроны высоких энергий двигаться по круговым орбитам, поэтому имеется тенденция проектировать будущие ускорители в виде прямых линий, а не окружностей. Интересная особенность этих линейных ускорителей состоит в том, что в более далеком будущем их можно будет нарастить до больших размеров.

Я надеюсь, что энтузиазм и усилия по проектированию и строительству таких установок не уменьшатся в будущем. Для этого требуется максимальная степень международного сотрудничества. Заманчивый проект [11] называется ELOISATRON — это установка, в которой максимальные возможные энергии должны быть достигнуты в невероятно большом круговом туннеле. Это может привести к стократному увеличению доступного нам пространственного разрешения. Однако меня беспокоит, что в реальности одна группа, одна нация выступает с инициативой, а затем другие группы и нации приглашаются к участию не столько в планировании, сколько в финансировании всего предприятия. Для меня очевидно, что наилучший вариант международного сотрудничества — это участие в проекте всех партнеров, начиная с самых ранних стадий. Самый большой успех будет сопутствовать тем организациям, которые максимально приблизятся к тому, что можно назвать "всемирной установкой". ЦЕРН утврж-

дает, что является всемирной установкой, и действительно, в таком качестве этому научному центру сопутствовал, и, надеюсь, и далее будет сопутствовать большой успех. К сожалению, его название все еще включает букву E. Эта буква должна стать столь же бессмысленной, как и буква N — в конце концов, изучаемая в ЦЕРНе физика давно перестала быть ядерной, она теперь субъядерная<sup>2</sup>. Я бы не стал предлагать сменить название CERN, но считаю, что его надо сохранить только как напоминание о богатой истории ЦЕРНа.

## 6. За пределами Стандартной модели

Другие, в равной степени интересные, крупные научные проекты будут многонациональными по самой своей природе: например, планируется создание пучков нейтрино, которые пройдут земной шар насквозь и будут регистрироваться в точке выхода, где, возможно, удастся установить, как едва уловимые осцилляции, обусловленные малой массой этих частиц, могут вызвать переходы одного типа нейтрино в другой. Создание всемирных установок не означает прекращения конкуренции, но конкуренция будет не между нациями, а скорее между различными коллаборациями, использующими разные установки и разные подходы к физическим проблемам.

Наиболее интересными и важными являются такие эксперименты, исход которых нельзя с уверенностью предсказать заранее. Именно так обстоит дело с экспериментами на ЛНС, запланированными на ближайшее будущее. Мы знаем наверняка, что Стандартная модель в ее сегодняшнем виде не может быть полностью правильной, *несмотря на то*, что взаимодействия остаются слабыми на сверхкоротких расстояниях. Слабости взаимодействий на малых расстояниях недостаточно; требуется также определенная *стабильность*. Давайте снова рассмотрим сравнение с планетами на орбитах. В этом примере требовалось, чтобы в течение чрезвычайно коротких временных интервалов силы, действующие на планеты, не оказывали бы существенного влияния на их скорости, так что планеты двигались бы приблизительно по прямым линиям. В наших современных теориях дело обстоит так, как если бы на малых временных интервалах на планеты действовали некоторые чрезвычайно большие силы, которые, однако, по каким-то причинам почти компенсируют друг друга. Результирующая сила так мала, что только по истечении длительного промежутка времени — дни, недели, месяцы — изменение скорости планет становится заметным. В таком случае, однако, необходимо определить *причину* того, что силы на малых временных масштабах компенсируются. Согласно современным представлениям, силы сокращаются как будто по чистой случайности. Это была бы необъяснимая случайность, и, поскольку другие примеры подобных случайностей в природе неизвестны, по крайней мере в таком масштабе, то естественно предположить, что истинная структура на малых расстояниях не совсем такова, как ее описывает Стандартная модель, и что имеются другие частицы и силы, природа которых пока неясна. Эти частицы и силы организованы в структуры с

новой симметрией, и именно эта симметрия объясняет сокращение сил на малых расстояниях.

По общему мнению, наиболее привлекателен сценарий, включающий "суперсимметрию" — некую симметрию, связывающую фермионы со спином, равным целому числу плюс одна вторая, и бозоны с целочисленным спином [12]. Это единственная симметрия, с помощью которой можно добиться желаемого результата в присутствии скалярных полей, обеспечивающих механизм Хиггса, в ситуации, когда все элементарные частицы взаимодействуют слабо. Однако на тот случай, когда взаимодействия становятся в конце концов сильными, имеются другие сценарии. Тогда объекты, играющие роль частицы Хиггса, могут быть не элементарными, а составными частицами, аналогичными так называемым куперовским парам связанных электронов, которые осуществляют механизм Хиггса в охлажденном до сверхнизких температур твердом веществе, что приводит к сверхпроводимости. Уже то, что подобные явления хорошо известны в физике, не позволяет с легкостью отбросить этот сценарий. Но поскольку нет никаких доказательств существования области нового сильного взаимодействия на масштабах тераэлектронвольт, большинство исследователей не приветствует теорию, в которой хиггсы являются связанными состояниями.

Одно из затруднений суперсимметричного сценария связано с механизмом нарушения суперсимметрии. Поскольку на масштабах длин, которые изучаются в современных экспериментах, не обнаружено никакой суперсимметрии, то эта симметрия является нарушенной. Предполагается, что нарушение происходит "мягко", т.е. его влияние заметно только на больших расстояниях, а симметрия реализуется только на самых малых возможных расстояниях. С точки зрения математики это возможно, однако до сих пор нет правдоподобного физического объяснения этой ситуации. Объяснение может дать только теория, имеющая дело с еще более малыми расстояниями, где в игру вступает гравитационная сила.

До начала 80-х годов наиболее перспективной моделью гравитационной силы была суперсимметричная разновидность гравитации — супергравитация [13]. Казалось, что проблемы бесконечностей, которые были совершенно непреодолимыми в теории обычной гравитации, будут преодолены в теории супергравитации. Странно, однако, что бесконечности, по-видимому, определяются расширенной симметрией, а не улучшенной мелкомасштабной структурой теории. Ньютонова константа, даже определяемая полем дилатона, в таких теориях все равно размерна, что приводит к неконтролируемым сильным взаимодействиям на малых расстояниях. Поскольку структура теории на малых расстояниях не была понята, то казалось, что из этой теории практически невозможно сделать выводы, которые могли бы пролить больше света на эмпирические свойства нашего мира.

Затем последовал период еще более рискованных теорий о природе гравитационной силы. Несомненно, самая популярная и потенциально наиболее мощная из них — это теория суперструн [14]. Развитие этой теории началось с предположения, что частицы представляют собой (открытые или замкнутые) куски струны. Живущие на струне фермионы добавляют суперсимметрию,

<sup>2</sup> CERN — сокращение от франц. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Европейский центр ядерных исследований). (Примеч. ред.)

которая может быть причиной приближенной суперсимметрии, необходимой для наших теорий. Сейчас известно, что только в пертурбативной формулировке частицы похожи на струны. В непертурбативном формализме, по-видимому, потребуются не только струны, но и объекты более высоких размерностей, например, мембраны. Но чем именно является упомянутое пертурбативное разложение? Это не аппроксимация, которую можно использовать на самых малых расстояниях. Напротив, представляется, что самые малые расстояния связаны с самыми большими через соотношения дуальности. Именно потому, что суперструны, как полагают, отвечают за гравитационную силу, они искривляют пространство и время до такой степени, что, по-видимому, бессмысленно рассматривать расстояния, *малые* по сравнению с планковской длиной.

Согласно теории суперструн, невозможность адекватного рассмотрения масштабов, меньших планковской длины — естественный и неизбежный аспект данной теории, и не стоит волноваться по этому поводу. Когда неспециалисты или, порой, коллеги из других областей физики нападают на теорию суперструн, я встаю на ее защиту. Эта теория очень убедительна и перспективна. Но для друзей у меня есть вот какое критическое замечание. Так как в теории струн широко используются дифференциальные уравнения, ясно, что предполагается некое подобие непрерывности. Надо попытаться уточнить формулировку теорий подобного рода на малых расстояниях, хотя бы для того, чтобы обосновать применение дифференциальных уравнений или даже функциональных интегралов.

Вместо того, чтобы рассматривать сказанное выше как критику в адрес существующих теорий, эти замечания следует воспринимать как указания на направление поиска дальнейших усовершенствований. Подчеркивание недостатков существующих построений — наилучший способ найти новые, более совершенные способы действий. Только таким образом мы можем надеяться прийти к теориям, которые позволят объяснить отмеченные структуры Стандартной модели, а также сделать

новые предсказания, чтобы мы могли сказать нашим друзьям-экспериментаторам, где следует искать новые частицы и поля.

Перевел с англ. *А.М. Семихатов*

## Список литературы

1. Об истории вопроса, см., например, Grease R P, Mann C C *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics* (New York: MacMillan, 1986)
2. См., например, Pais A *Inward Bound: of Matter and Forces in the Physical World* (Oxford: Clarendon Press, 1986)
3. Wilson K G, Kogut J *Phys. Rep.* **12** 75 (1974); Politzer H D *Phys. Rep.* **14** 129 (1974)
4. Описание см. в кн. Lee B W *Chiral Dynamics* (New York: Gordon and Breach, 1972) pp. 60–67
5. Gross D J, in *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s* (Eds L Hoddeson et al.) (New York: Cambridge Univ. Press, 1997) p. 99
6. 't Hooft G *Nucl. Phys. B* **35** 167 (1971)
7. Coleman S “Secret symmetries”, in *Laws of Hadronic Matter* (Subnuclear Ser., Vol. 11, Ed. A Zichichi) (New York: Academic Press, 1975)
8. Higgs P W *Phys. Lett.* **12** 132 (1964); *Phys. Rev. Lett.* **13** 508 (1964); *Phys. Rev.* **145** 1156 (1966); Englert F, Brout R *Phys. Rev. Lett.* **13** 321 (1964)
9. См., например, Accomando E et al. *Phys. Rep.* **299** 1 (1998) и Zerwas P M “Physics with an  $e^+e^-$  linear collider at high luminosity” Cargèse Lectures 1999, Preprint DESY 99-178 (Hamburg: DESY, 1999); hep-ph/0003221
10. Ellis J “Possible accelerators at CERN beyond the LHC” Preprint CERN-TH/99-350 (Geneva: CERN, 1999); hep-ph/9911440
11. Zichichi A *Subnuclear Physics: the First Fifty Years: Highlights from Erice to ELN. The Galvani Bicentenary Celebrations* (Bologna: Academia delle Scienze and Bologna, 1998) pp. 117–135
12. Имеется обширная литература по суперсимметрии. См., например, собрание статей в кн. Ferrara S (Ed.) *Supersymmetry* Vol. 1 (Amsterdam: North-Holland, 1987)
13. Ferrara S (Ed.) *Supersymmetry* Vol. 2 (Amsterdam: North-Holland, 1987)
14. См., например, Polchinski J *String Theory* Vol. 1 *An Introduction to the Bosonic String* (Cambridge Monographs on Mathematical Physics, Ed. Landshoff et al.) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998)