

Рубаков В.А.

К открытию новой фундаментальной частицы – бозона Хиггса – на Большом адронном коллайдере

Институт ядерных исследований РАН

1 Введение

4 июля 2012 года состоялось событие, имеющее выдающееся значение для современной физики: в ЦЕРНе было объявлено об открытии новой частицы, свойства которой, как осторожно заявляют авторы открытия, соответствуют ожидаемым свойствам теоретически предсказанного элементарного бозона Стандартной модели физики частиц (о том, что такое бозон и что такое Стандартная модель, мы поговорим ниже). Следуя распространенной терминологии, этот бозон часто называют бозоном Хиггса, хотя это название не вполне адекватно (мы об этом еще скажем несколько слов в разделе 3.3). Как бы то ни было, речь идет об открытии одного из центральных объектов фундаментальной физики, не имеющего аналогов среди известных элементарных частиц и занимающего уникальное место в физической картине мира.

Объявление о семинаре, который состоялся 4 июля в ЦЕРНе, было сделано в конце июня, и сразу стало ясно, что этот семинар будет неординарным. Дело в том, что первые указания на существование нового бозона были получены еще в декабре 2011 года в экспериментах ATLAS и CMS, выполняемых на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. Кроме того, незадолго до семинара появилось сообщение о том, что данные, полученные на протон-антипротонном коллайдере Tevatron (Fermilab, США), также указывают на существование нового бозона. Всего этого было недостаточно для того, чтобы можно было говорить об открытии, но с декабря количество данных, набранных на Большом адронном коллайдере, удвоилось и, кроме того, были усовершенствованы методы их обработки. Результат оказался впечатляющим: в каждом из экспериментов ATLAS и CMS по отдельности статистическая достоверность сигнала достигла уровня, который в физике элементарных частиц считается уровнем открытия (5 стандартных отклонений).

Семинар прошел в праздничной атмосфере. Его участниками, помимо ученых, работающих в ЦЕРНе, и студентов, занимающихся в ЦЕРНе по летним программам, стали участники крупнейшей конференции по физике высоких энергий, которая как раз открылась 4 июля в Мельбурне. Семинар транслировался по Интернету в научные центры и университеты всего мира, включая, конечно, Россию. После впечатляющих выступлений руководителей (spokespersons) коллабораций CMS Джо Инкандела и ATLAS Фабиолы Джанотти генеральный директор ЦЕРНа Рольф Хойер заключил: «I think we have it!», «Думаю, он у нас в руках!»

Так что же «у нас в руках», и зачем его придумали теоретики?

2 Что представляет собой новая частица

Прежде всего, скажем, что минимальная версия теории микромира носит неуклюжее название Стандартной модели. Эта теория описывает все известные элементарные частицы (мы их перечислим ниже) и все известные взаимодействия между ними.⁵⁴ Бозон Хиггса был единственным не открытым до последнего времени элементом Стандартной модели.

Мы назвали Стандартную модель минимальной именно потому, что других элементарных частиц в ней нет. В частности, в ней имеется один и только один бозон Хиггса, и он является элементарной, а не составной частицей (мы поговорим о других возможностях в разделе 4). Большинство аспектов Стандартной модели – за исключением нового сектора, к которому

⁵⁴ Гравитационное взаимодействие стоит особняком: независимо от того, какие бывают элементарные частицы, оно описывается общей теорией относительности Эйнштейна.

принадлежит бозон Хиггса – проверены в многочисленных экспериментах, и главная задача Большого адронного коллайдера – выяснить, действительно ли в природе реализуется минимальный вариант теории и насколько полно эта теория описывает микромир.⁵⁵ (О том, что такое коллайдер и какие коллайдеры были построены, см. в Приложении).

Вполне естественно, что программа поиска бозона Хиггса была с самого начала одной из главных, если не самой главной, на Большом адронном коллайдере. В ходе выполнения этой программы и была открыта новая частица. Она довольно тяжелая по меркам физики микромира. В этой области науки массу измеряют в единицах энергии, имея в виду связь $E = mc^2$ между массой и энергией покоя. В качестве единицы энергии используют электронвольт (эВ) – энергию, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов 1 Вольт, и производные – МэВ (миллион электронвольт, 10^6 эВ), ГэВ (миллиард электронвольт, 10^9 эВ), ТэВ (триллион электронвольт, 10^{12} эВ). Масса электрона в этих единицах равна 0,5 МэВ, протона – примерно 1 ГэВ, масса самой тяжелой известной элементарной частицы, t -кварка – 173 ГэВ.⁵⁶ Так вот, **масса новой частицы составляет 125–126 ГэВ** (неопределенность связана с погрешностью измерений).

Эта новая частица, назовем ее H , не имеет электрического заряда. Она нестабильна и может распадаться по-разному. На Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе ее открыли, изучая распады в два фотона, $H \rightarrow \gamma\gamma$, и в две пары электрон–позитрон и/или мюон–антимюон⁵⁷ $H \rightarrow e^+e^-e^+e^-$, $H \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$, $H \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$. Второй тип процессов записывают как $H \rightarrow 4l$, где l обозначает одну из частиц e^+ , e^- , μ^+ или μ^- (их коллективно называют лептонами). Обе коллаборации CMS и ATLAS сообщают также о некотором избытке событий, который можно объяснить распадами $H \rightarrow 2l2\nu$, где ν – нейтрино (еще один тип элементарных частиц). Этот избыток, впрочем, пока не имеет высокой статистической достоверности.

Напомним, что элементарные частицы могут обладать спином – внутренним угловым моментом. Спин частицы может быть целым (включая нуль) или полуцелым единицах постоянной Планка \hbar . **Частицы с целым и полуцелым спином называются бозонами и фермионами**, соответственно. Все известные до последнего времени элементарные частицы имеют ненулевой спин; так, спин электрона равен 1/2 в единицах \hbar , а спин фотона равен 1. Из существования обсуждавшихся распадов следует, что спин новой частицы целый – она является бозоном.⁵⁸ Кроме того, ее спин не может быть равным единице (частица спина 1 не может распадаться на два фотона). Остается спин 0, 2 или выше.⁵⁹ Хотя прямого экспериментального измерения спина новой частицы пока нет, крайне маловероятно, что мы имеем дело с частицей спина 2 или больше. Почти наверняка спин H равен нулю. Как мы увидим, именно таким должен быть бозон Хиггса.

Вообще всё, что сейчас известно о новой частице, согласуется с ее интерпретацией как бозона Хиггса, предсказанного простейшей версией теории элементарных частиц – Стандартной моделью. В рамках Стандартной модели можно вычислить как вероятность рождения бозона Хиггса в протон-протонных столкновениях на Большом адронном коллайдере, так и вероятности его распадов $H \rightarrow \gamma\gamma$ и $H \rightarrow 4l$, и тем самым предсказать число ожидаемых событий. Эти предсказания и подтверждаются экспериментом, конечно, в пределах экспериментальных погрешностей. Эти погрешности пока велики, да и измеренных величин, как мы видим, пока

⁵⁵ Стандартная модель на самом деле заведомо неполна, но это предмет отдельного разговора. Отметим только, что о ее неполноте свидетельствуют данные космологии – науки о Вселенной. Проявится ли неполнота Стандартной модели при энергиях Большого адронного коллайдера – открытый и интригующий вопрос.

⁵⁶ Кварки – один из типов элементарных частиц. В свободном состоянии они в природе не наблюдаются, а всегда связываются друг с другом и образуют составные частицы – адроны (t -кварк – исключение, он распадается до того, как объединится с другими кварками или антикварками в адрон). К адронам относятся протон, нейтрон, π -мезоны, K -мезоны и др.

⁵⁷ Мюон – тяжелый, нестабильный аналог электрона с массой $m_\mu = 106$ МэВ. Время жизни мюона $\tau_\mu = 2 \cdot 10^{-6}$ с достаточно велико для того, чтобы он пролетал через весь детектор, не распадаясь.

⁵⁸ Это следует, например, из сохранения углового момента в распаде $H \rightarrow \gamma\gamma$: спин каждого из фотонов целый, целыми всегда является и орбитальный угловой момент, в данном случае пары фотонов. Поэтому полный угловой момент конечного, а значит и начального состояния тоже целый.

⁵⁹ Спин – это вектор, векторная сумма спинов двух фотонов может быть равна нулю; с другой стороны, орбитальный угловой момент двух фотонов может принимать любое целое значение, поэтому закон сохранения углового момента не запрещает высокого значения спина H -частицы.

совсем немного. Тем не менее, трудно сомневаться в том, что открыт именно бозон Хиггса или что-то очень похожее на него, особенно если учесть, что распады $H \rightarrow \gamma\gamma$ и $H \rightarrow 4l$ должны быть очень редкими: на два фотона распадается 2 из 1000 бозонов Хиггса, а на две e^+e^- и/или $\mu^+\mu^-$ пары – 1 из 10000.

Боле́е чем в половине случаев бозон Хиггса должен распадаться на пару b -кварк– b -антикварк⁶⁰: $H \rightarrow bb^-$. Рождение пары bb^- в протон-протонных (и протон-антипротонных) столкновениях – явление очень частое и без всякого бозона Хиггса, и выделить сигнал от бозона Хиггса из этого «шума» (физики говорят «фона») в экспериментах на Большом адронном коллайдере пока не удалось. Это отчасти получилось в экспериментах на коллайдере Tevatron, хотя статистическая достоверность там заметно ниже, чем в ЦЕРНе. Эти данные также согласуются с предсказаниями Стандартной модели.

Заканчивая описание известных свойств новой частицы, скажем, что живет она довольно долго по меркам физики микромира. На основе имеющихся экспериментальных данных можно получить оценку снизу на ее время жизни $\tau_H \geq 10^{-24}$ с, что не противоречит предсказанию Стандартной модели $\tau_H = 1,6 \cdot 10^{-22}$ с. Для сравнения, время жизни t -кварка составляет $\tau_t = 3 \cdot 10^{-25}$ с. Отметим, что прямое измерение времени жизни новой частицы на Большом адронном коллайдере вряд ли возможно.

3 Зачем нужен новый бозон?

В квантовой физике каждая элементарная частица является квантом некоторого поля, и наоборот, каждому полю соответствует своя частица-квант; наиболее известный пример – электромагнитное поле и его квант, фотон. Поэтому вопрос, поставленный в заглавии этого раздела, можно переформулировать так:

Зачем нужно новое поле и каковы его ожидаемые свойства?

Краткий ответ состоит в том, что симметрии теории микромира – будь то Стандартная модель или какая-то более сложная теория – запрещают элементарным частицам иметь массы, а новое поле нарушает эти симметрии и обеспечивает существование масс частиц. В Стандартной модели – простейшем варианте теории (но только в ней!) – все свойства нового поля и, соответственно, нового бозона, за исключением его массы, однозначно предсказываются опять-таки на основе соображений симметрии. Как мы говорили, имеющиеся экспериментальные данные согласуются именно с простейшим вариантом теории, однако эти данные пока довольно скудны, и предстоит длительная работа по выяснению того, как именно устроен новый сектор физики элементарных частиц.

Расшифровка этого короткого абзаца требует, конечно, рассмотрения, хотя бы в общих чертах, роли симметрии в физике микромира.

3.1 Симметрии, законы сохранения и запреты

Общим свойством физических теорий, будь то ньютонова механика, механика специальной теории относительности, квантовая механика или теория микромира, является то, что каждой симметрии соответствует свой закон сохранения. Например, симметрии относительно сдвигов во времени (т.е. тому обстоятельству, что законы физики одинаковы в каждый момент времени) соответствует закон сохранения энергии, симметрии относительно сдвигов в пространстве – закон сохранения импульса, а симметрии относительно поворотов в пространстве (все направления в пространстве равноправны) – закон сохранения углового момента. Законы сохранения можно интерпретировать и как запреты: перечисленные симметрии запрещают изменение энергии, импульса и углового момента замкнутой системы при ее эволюции.

Наоборот, каждому закону сохранения соответствует своя симметрия; это утверждение является точным в квантовой теории. Спрашивается, какая же симметрия соответствует закону сохранения электрического заряда? Ясно, что симметрии пространства и времени, о которых мы только что упомянули, здесь ни при чем. Тем не менее, такая симметрия имеется. Дело в том, что помимо очевидных, пространственно-временных симметрий существуют неочевидные, «внутренние» симметрии. Одна из них и приводит к сохранению электрического заряда. Для нас важно, что эта же внутренняя симметрия (только понимаемая в расширенном смысле – физики

⁶⁰ b -кварк – один из шести типов кварков, второй по массе после t -кварка.

употребляют термин «калибровочная инвариантность») объясняет и тот факт, что у света могут быть только два типа поляризации – левая и правая.

Чтобы показать, насколько нетривиален факт наличия только двух типов поляризации света, отвлекемся на время от разговора о симметриях и снова напомним, что элементарные частицы характеризуются спином, который может быть полуцелым или целым в единицах постоянной Планка \hbar . Элементарные фермионы (частицы полуцелого спина) имеют спин $1/2$. Это электрон e , электронное нейтрино ν_e , тяжелые аналоги электрона – мюон μ и тау-лептон τ , их нейтрино ν_μ и ν_τ , кварки шести типов u, d, c, s, t, b и соответствующие всем им античастицы (позитрон e^+ , антинейтрино $\bar{\nu}_e$, антикварк \bar{u} и т.д.). Кварки u и d – легкие, и из них состоит протон (кварковый состав uud) и нейтрон (udd). Остальные кварки – более тяжелые; они входят в состав короткоживущих частиц, например, K -мезонов.

Частицы целого спина называют бозонами. К ним относится фотон, он имеет спин 1. Единичным спином обладают и глюоны – отдаленные аналоги фотона, отвечающие за взаимодействия между кварками и связывающие их в протон, нейтрон и другие составные частицы. Кроме того, есть еще три частицы спина 1 – уже упоминавшиеся электрически заряженные W^+ , W^- -бозоны и нейтральный Z -бозон. О них еще пойдет речь впереди. Ну, а частица Хиггса должна иметь нулевой спин.⁶¹

Заметим, кстати, что мы только что перечислили **все** элементарные частицы, имеющиеся в Стандартной модели, см. рис. 1.

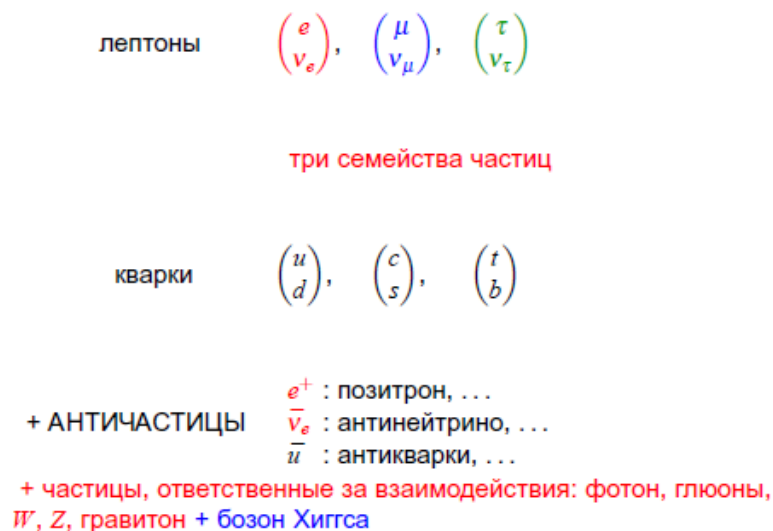


Рис.1. Все частицы Стандартной Модели

Вернемся к свойствам частиц со спином. Массивная частица спина s (в единицах \hbar) имеет $(2s + 1)$ состояний с разными проекциями спина на заданную ось (спин – внутренний угловой момент – это вектор, так что понятие о его проекции на заданную ось имеет обычный смысл). Например, спин электрона ($s = 1/2$) в его системе покоя может быть направлен вверх ($s_z = +1/2$) или вниз ($s_z = -1/2$). Бозон Z обладает ненулевой массой и спином $s = 1$, поэтому состояний с разными проекциями спина у него три: $s_z = +1, 0$ или -1 . Совершенно иначе обстоит дело с безмассовыми частицами. Поскольку они летают со скоростью света, перейти в систему отсчета,

⁶¹ Отметим, что все перечисленные частицы, кроме протона, электрона, нейтрино и их античастиц, нестабильны: они распадаются на другие частицы. Впрочем, два типа нейтрино из трех тоже должны быть нестабильными, но их время жизни чрезвычайно велико. В физике микромира действует принцип: «Всё, что может происходить, действительно происходит». Поэтому стабильность частицы связана с каким-то законом сохранения. Электрону и позитрону запрещает распадаться закон сохранения заряда (электрон и позитрон – легчайшие частицы с зарядом -1 и $+1$ соответственно). Легчайшее нейтрино (легчайшая частица спина $1/2$) не может распадаться из-за сохранения углового момента. Распад протона запрещен законом сохранения еще одного «заряда», который называют барионным числом (барионное число протона по определению равно 1, а у более легких частиц оно равно нулю). Кстати, с барионным числом связана еще одна внутренняя симметрия, общее правило действует. Является ли эта симметрия точной или приближенной, в точности ли стабилен протон или он имеет конечное, хотя и очень большое время жизни – предмет отдельного разговора.

где такая частица покоится, нельзя. Тем не менее, можно говорить о ее спиральности – проекции спина на направление движения. Так вот, несмотря на то, что спин фотона равен единице, таких проекций может быть всего две – вдоль и против направления движения. Это и есть правая и левая поляризации фотона (света). Третье состояние с нулевой проекцией спина, которое обязано было бы существовать, будь у фотона масса, **запрещено** глубокой внутренней симметрией электродинамики, той самой симметрией, что приводит к сохранению электрического заряда. Таким образом, **эта внутренняя симметрия запрещает и существование массы у фотона!**

3.2 Что-то не так!

Ключевыми для нас являются, однако, не фотоны, а W^\pm - и Z -бозоны. Эти частицы, открытые в 1983 году на протон-антипротонном коллайдере $Spp\bar{S}$ в ЦЕРНе и задолго до этого предсказанные теоретиками, обладают спином 1 и довольно большой массой: W^\pm -бозоны имеют массу 80 ГэВ (то есть они примерно в 80 раз тяжелее протона), а Z -бозон – 91 ГэВ. Свойства W^\pm - и Z -бозонов сейчас хорошо известны, благодаря в основном экспериментам на электрон-позитронных коллайдерах LEP (ЦЕРН) и SLC (SLAC, США)⁶² и протон-антипротонном коллайдере Tevatron (Fermilab, США): точность измерений целого ряда величин, относящихся к W^\pm - и Z -бозонам, лучше 0,1%. Эти свойства, как и свойства других частиц, прекрасно описываются Стандартной моделью. Последнее замечание относится и к взаимодействиям W^\pm - и Z -бозонов с электроном, нейтрино, кварками и другими частицами. Эти взаимодействия, кстати, называют слабыми. Они изучены во всех деталях; один из давно известных примеров их проявления – β -распады мюона, нейтрона и ядер, см. рис. 2.

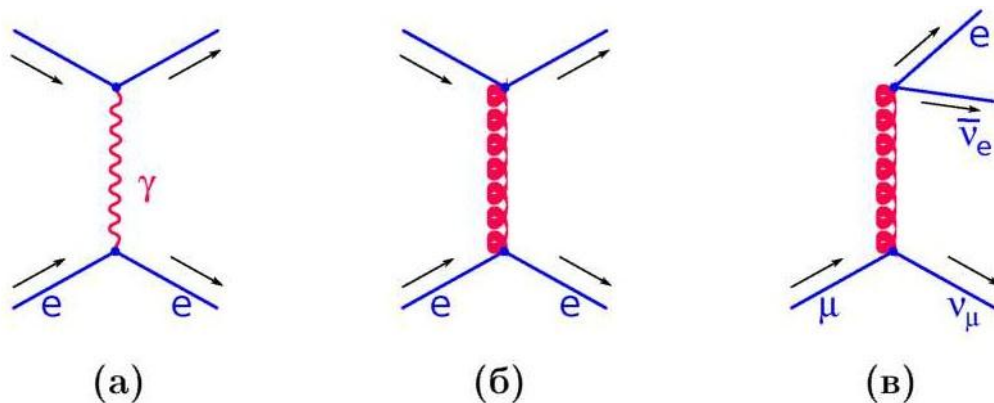


Рис. 2: Электромагнитные взаимодействия возникают благодаря излучению и поглощению фотонов (а). Слабые взаимодействия имеют похожую природу: они обусловлены излучением и поглощением (или распадом) Z -бозонов (б) и W -бозонов (в). В последнем случае меняется и тип фермиона. На рис. (в) показан процесс, приводящий к β -распаду мюона: $\mu \rightarrow e\nu_\mu\bar{\nu}_e$. Он происходит путем рождения и распада W -бозона. Аналогичный процесс приводит к β -распаду нейтрона и некоторых атомных ядер.

Как мы уже говорили, каждый из W^\pm - и Z -бозонов может находиться в трех спиновых состояниях, а не в двух, как фотон. Тем не менее, их взаимодействия с фермионами (нейтрино, кварками, электроном и т.д.) устроены в принципе так же, как взаимодействие фотона. Например, фотон взаимодействует с электрическим зарядом электрона и электрическим током, который создает движущийся электрон. Точно так же, Z -бозон взаимодействует с некоторым зарядом электрона и током, возникающим при движении электрона, только эти заряд и ток не совпадают с электрическими. С точностью до важной особенности, о которой пойдет вскоре речь, аналогия будет полной, если помимо электрического заряда электрону приписать еще и Z -заряд. Своими Z -зарядами обладают и кварки, и нейтрино.

Аналогия с электродинамикой простирается еще дальше. Так же, как и теория фотона, теория W^\pm - и Z -бозонов обладает глубокой внутренней симметрией, близкой к той, что приводит

⁶² Мы здесь несколько упрощаем ситуацию, не греша, впрочем, против существа дела. В действительности фотоны, W^\pm - и Z -бозоны вместе описываются единой теорией с общей, довольно широкой внутренней симметрией.

к закону сохранения электрического заряда.⁶³ В полной аналогии с фотоном, эта внутренняя симметрия запрещает W^\pm - и Z -бозонам иметь третью поляризацию, а стало быть и массу. Вот тут и получается нестыковка: симметричный запрет на массу частицы спина 1 действительно работает в случае фотона, а в случае W^\pm - и Z -бозонов он **не работает!**

Дальше – больше. Слабые взаимодействия – взаимодействия электронов, нейтрино, кварков и других частиц с W^\pm - и Z -бозонами – устроены так, как если бы эти фермионы не имели никакой массы! Дело здесь не в числе поляризаций: и у массивных, и у безмассовых фермионов поляризаций (направлений спина) может быть ровно две. Дело в том, как именно взаимодействуют фермионы с W^\pm - и Z -бозонами.

Чтобы пояснить суть проблемы, выключим сначала массу электрона (в теории такое позволено) и рассмотрим воображаемый мир, в котором масса электрона равна нулю. В таком мире электрон летал бы со скоростью света и мог иметь спин, направленный вдоль направления движения или против него. Так же как и для фотона, в первом случае мы говорили бы об электроне с правой поляризацией или, короче, о правом электроне, во втором – о левом электроне.

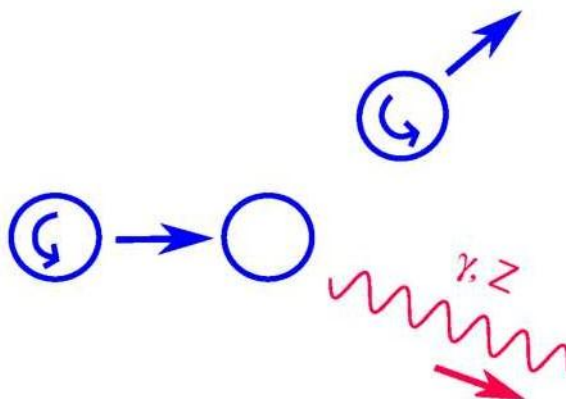


Рис. 3: При излучении фотона быстро движущимся электроном проекция спина на его направление движения не меняется. Это же справедливо и для испускания Z -бозона. Внутреннее вращение электрона условно показано круглой стрелкой.

Поскольку мы хорошо знаем, как устроены электромагнитные и слабые взаимодействия (а только в них электрон и участвует), мы вполне способны описать свойства электрона в нашем воображаемом мире. А они таковы. Во-первых, в этом мире правый и левый электроны – две совершенно разные частицы: правый электрон никогда не превращается в левый, и наоборот. Действительно, превращение правого электрона в левый на лету запрещено законом сохранения углового момента (в данном случае спина), а взаимодействия электрона с фотоном и Z -бозоном не меняют его поляризацию, рис. 3. Во-вторых, взаимодействие электрона с W -бозоном испытывает только левый электрон, а правый в нем вообще не участвует. Третьей важной особенностью, о которой мы обмолвились выше, является в этой картине то, что Z -заряды **левого и правого электрона различны**, левый электрон взаимодействует с Z -бозоном сильнее, чем правый. Аналогичные свойства имеются и у мюона, и у тау-лептона, и у кварков.

Подчеркнем, что в воображаемом мире с безмассовыми фермионами нет никаких проблем с тем, что левые и правые электроны взаимодействуют с W - и Z -бозонами по-разному, в частности, что «левый» и «правый» Z -заряды различны. В этом мире левые и правые электроны – это разные частицы, и дело с концом: нас же не удивляет, что разные частицы, например, электрон и нейтрино, имеют разные электрические заряды (в данном случае – 1 и 0).

Попробуем теперь включить массу электрона – и немедленно придем к противоречию. Быстро движущийся электрон, скорость которого близка к скорости света, а спин направлен против направления движения, выглядит почти так же, как левый электрон из нашего воображаемого мира. И взаимодействовать он должен почти так же.⁶⁴ Если это взаимодействие

⁶³ Оговорки здесь и ниже связаны с тем, что довольно похожие механизмы были известны до этого в физике конденсированных сред благодаря работам Лондона, Гинзбурга–Ландау, Боголюбова, Бардина–Купера–Шриффера, Андерсона и других.

⁶⁴ В реальном мире для ограниченного (но только ограниченного!) круга процессов так оно и оказывается. Например, взаимодействие быстрого массивного электрона, спин которого направлен против

связано с Z -зарядом, то этот быстрый электрон должен иметь «левое» значение Z -заряда такое же, как Z -заряд левого электрона в нашем воображаемом мире. Однако скорость массивного электрона все-таки меньше скорости света, и всегда можно перейти в систему отсчета, движущуюся еще быстрее. В новой системе направление движения электрона изменится на противоположное, а направление спина останется прежним. Проекция спина на направление движения будет теперь положительной, и такой электрон будет выглядеть как правый, а не левый.⁶⁵

Соответственно, и Z -заряд должен быть таким же, как у правого электрона из нашего воображаемого мира. Такого не может быть: значение заряда не должно зависеть от системы отсчета. Противоречие налицо. Подчеркнем, что мы пришли к нему, предполагая, что Z -заряд сохраняется: если заряд не сохраняется, то о его значении для данной частицы и говорить не приходится.

Это противоречие показывает, что симметрии Стандартной модели (для определенности будем говорить о ней, хотя всё сказанное относится к любому другому варианту теории) должны были бы запрещать существование масс не только у W^\pm - и Z -бозонов, но и у фермионов. Причем тут симметрии? При том, что они должны были бы приводить к сохранению Z -заряда. Измерив Z -заряд электрона, мы смогли бы однозначно сказать, левый этот электрон или правый. А это возможно только тогда, когда масса электрона равна нулю.

Таким образом, в мире, где все симметрии Стандартной модели реализовывались бы так же, как в электродинамике, все элементарные частицы должны были бы иметь нулевые массы. В реальном мире эти массы есть, значит, с симметриями Стандартной модели что-то должно происходить.

3.3 Нарушение симметрии

Говоря о связи симметрий с законами сохранения и запретами, мы упустили из виду одно обстоятельство. Оно заключается в том, что законы сохранения и симметричные запреты выполняются только тогда, когда симметрия присутствует явно. Однако симметрии могут быть и нарушенными. Например, в однородном образце железа при комнатной температуре всегда имеется магнитное поле, направленное в какую-то сторону; образец представляет собой магнит. Если бы существовали микроскопические существа, живущие внутри этого магнита, то они бы обнаружили, что не все направления пространства вокруг них равноправны: на электрон, летящий поперек магнитного поля, действует сила со стороны магнитного поля – сила Лоренца, а на электрон, летящий вдоль поля, сила не действует; движение электрона вдоль магнитного поля происходит по прямой, поперек поля – по окружности, а в общем случае – по спирали, рис. 4. Стало быть, магнитное поле внутри образца нарушает симметрию относительно вращений в пространстве. В связи с этим внутри магнита не выполняется и закон сохранения углового момента: при движении электрона по спирали проекция углового момента на ось, перпендикулярную магнитному полю, меняется со временем.

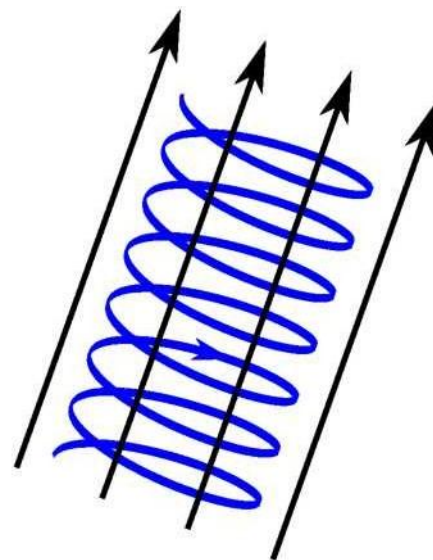


Рис. 4: В однородном магнитном поле (показано стрелками) электрон движется по спирали.

Здесь мы имеем дело со **спонтанным** нарушением симметрии. В отсутствие внешних воздействий (например, магнитного поля Земли) в разных образцах железа магнитное поле может быть направлено в разные стороны, и ни одно из этих направлений не будет предпочтительнее другого. Исходная симметрия относительно вращений по-прежнему имеется, и

направления движения, с покоящейся или медленно движущейся мишенью (скажем, атомным ядром) практически не отличается от взаимодействия левого безмассового электрона.

⁶⁵ Противоречия с утверждением, сделанным в предыдущей сноске, здесь нет: в новой системе мишень движется быстрее электрона, и в реальном мире взаимодействие электрона с ней существенно отличается от взаимодействия с покоящейся мишенью.

проявляется она в том, что магнитное поле в образце может быть направлено куда угодно. Но раз уж магнитное поле возникло, появилось и выделенное направление, и симметрия внутри магнита оказалась нарушенной. На более формальном уровне, **уравнения**, управляющие взаимодействием атомов железа между собой и с магнитным полем, **симметричны** относительно вращений в пространстве, но **состояние** системы этих атомов – образца железа – **несимметрично**. В этом и состоит явление спонтанного нарушения симметрии. Отметим, что мы здесь говорим о наиболее выгодном состоянии, имеющем наименьшую энергию; такое состояние называют основным. Именно в нем окажется в конце концов образец железа, даже если изначально он был немагнитным, рис. 5.

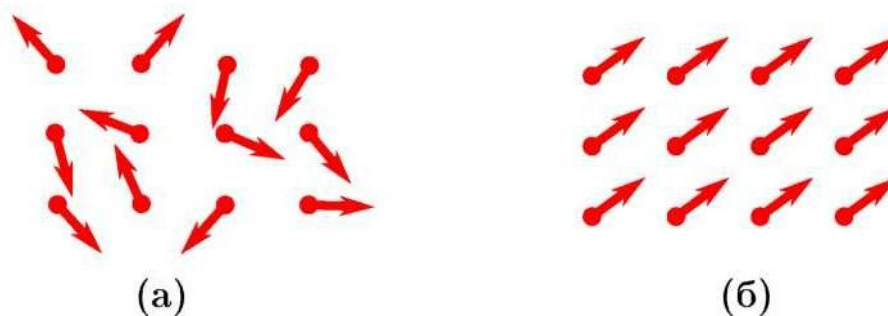


Рис. 5: Немагнитное (а) и намагнитное (б) состояние атомов железа. Стрелками показаны направления магнитных моментов атомов. Немагнитного начального состояния можно в принципе добиться, разогрев образец до высокой температуры, а потом мгновенно остудив. Из такого состояния образец всё равно перейдет в намагнитное: магнитным моментам атомов энергетически выгодно выстроиться. Выстроенные магнитные моменты создадут в образце магнитное поле, направленное так же, как магнитные моменты.

Итак, спонтанное нарушение некоторой симметрии имеет место тогда, когда уравнения теории симметричны, а основное состояние – нет. Слово «спонтанное» употребляют в этом случае в связи с тем, что система сама, без нашего участия, выбирает несимметричное состояние, поскольку именно оно является энергетически наиболее выгодным. Из приведенного примера ясно, что если симметрия спонтанно нарушена, то вытекающие из нее законы сохранения и запреты не работают; в нашем примере это относится к сохранению углового момента. Подчеркнем, что полная симметрия теории может быть нарушена лишь частично: в нашем примере из полной симметрии относительно всех вращений в пространстве остается явной, ненарушенной симметрия относительно вращений вокруг направления магнитного поля.

Микроскопические существа, живущие внутри магнита, могли бы задать себе вопрос: «В нашем мире не все направления равноправны, угловой момент не сохраняется, но является ли пространство фундаментально несимметричным относительно вращений?» Изучив движение электронов и построив соответствующую теорию (в данном случае электродинамику), они бы поняли, что ответ на этот вопрос отрицателен: уравнения этой теории симметричны, но эта симметрия спонтанно нарушена за счет «разлитого» вокруг них магнитного поля. Развивая эту теорию дальше, они бы предсказали, что поле, отвечающее за спонтанное нарушение симметрии, должно иметь свои кванты, фотоны. И построив внутри магнита маленький ускоритель, с радостью убедились бы, что эти кванты действительно существуют – они рождаются в столкновениях электронов!

В общих чертах ситуация в физике элементарных частиц похожа на ту, что мы только что описали. Но есть и важные отличия. Во-первых, ни о какой среде наподобие кристаллической решетки атомов железа говорить уже не приходится. Состоянием с наименьшей энергией в природе является вакуум (по определению!). Это не означает, что в вакууме – основном состоянии природы – не может быть однородно «разлитых» полей, подобных магнитному полю в нашем примере. Наоборот, нестыковки, о которых мы говорили в разделе 3.2, свидетельствуют о том, что симметрии Стандартной модели (точнее, их часть) должны быть спонтанно нарушенными, а это предполагает, что в вакууме имеется какое-то поле, обеспечивающее это нарушение. Во-вторых, речь идет не о пространственно-временных, как в нашем примере, а о внутренних симметриях. Пространственно-временные симметрии, наоборот, не должны нарушаться из-за присутствия поля в вакууме. Отсюда следует важный вывод о том, что в

отличие от магнитного, это поле не должно выделять никакого направления в пространстве (точнее, в пространстве-времени, поскольку мы имеем дело с релятивистской физикой). Поля с таким свойством называют **скалярными**; им соответствуют **частицы спина 0**. Стало быть, поле, «разлитое» в вакууме и приводящее к нарушению симметрии, должно быть новым. Действительно, известным полям, о которых мы явно или неявно упоминали выше – электромагнитному полю, полям W^\pm - и Z -бозонов, глюонов – соответствуют частицы спина 1, такие поля выделяют направления в пространстве-времени и называются **векторными**, а нам требуется скалярное. Поля, соответствующие фермионам (спин 1/2), тоже не годятся. В-третьих, новое поле должно нарушать симметрии Стандартной модели не полностью, внутренняя симметрия электродинамики должна оставаться ненарушенной. Наконец, и это самое главное, взаимодействие нового поля, «разлитого» в вакууме, с W^\pm - и Z -бозонами, электронами и другими фермионами должно приводить к появлению масс у этих частиц.

Механизм генерации масс частиц со спином 1 – в природе это W^\pm - и Z -бозоны – за счет спонтанного нарушения симметрии был предложен в контексте физики элементарных частиц⁶⁶ теоретиками из Брюсселя Франсуа Энглером и Робертом Браутом и чуть позже – физиком из Эдинбурга Питером Хиггсом.⁶⁷ Произошло это в 1964 году. Они опирались на представление о спонтанном нарушении симметрии (но в теориях без векторных полей, т.е., без частиц спина 1), которое было введено в физику элементарных частиц в 1960–61 годах в работах И. Намбу, И. Намбу и Дж. Йона-Лазинио, В.Г. Вакса и А.И. Ларкина, Дж. Голдстоуна⁶⁸ (Йоичиро Намбу получил за это Нобелевскую премию в 2008 году). В отличие от предыдущих авторов, Энглер, Браут и Хиггс рассмотрели теорию (в то время умозрительную), в которой присутствует как скалярное (спин 0), так и векторное поле (спин 1). В этой теории имеется внутренняя симметрия, вполне аналогичная той симметрии электродинамики, которая приводит к сохранению электрического заряда и запрету массы фотона, но в отличие от электродинамики внутренняя симметрия спонтанно нарушена однородным скалярным полем, имеющимся в вакууме. Замечательным результатом Энглера, Браута и Хиггса стала демонстрация того факта, что это нарушение симметрии автоматически влечет за собой появление массы у частицы спина 1 – кванта векторного поля!

Довольно прямолинейное обобщение механизма Энглера–Браута–Хиггса, связанное с включением в теорию фермионов и их взаимодействия с нарушающим симметрию скалярным полем, приводит к тому, что массы появляются и у фермионов. Всё начинает становиться на свои места! Стандартная модель теперь получается в результате дальнейшего обобщения путем включения не одного, а нескольких векторных полей – фотона, W^\pm - и Z -бозонов (глюоны – это отдельная история, они к механизму Энглера–Браута–Хиггса отношения не имеют) – и разных типов фермионов. Последний шаг на самом деле весьма нетривиален; за формулировку полной теории слабых и электромагнитных взаимодействий Стивен Вайнберг, Шелдон Глэшоу и Абдус Салам⁶⁹ получили в 1979 году Нобелевскую премию.

Вернемся в 1964 год. Для исследования свойств своей теории Энглер и Браут использовали довольно вычурный по сегодняшним меркам подход. Наверное поэтому они не заметили, что наряду с массивной частицей спина 1 эта теория предсказывает существование еще одной частицы – бозона со спином 0. А вот Хиггс заметил, и сейчас эту новую бесспиновую частицу часто называют бозоном Хиггса. Как я отметил в начале статьи, такая терминология представляется не вполне корректной: ключевое предложение использовать скалярное поле для спонтанного нарушения симметрии и генерации масс частиц спина 1 впервые сделали всё же Энглер и Браут. Не вдаваясь больше в терминологию, подчеркнем, что новый бозон с нулевым спином является квантом того самого скалярного поля, которое нарушает симметрию. И в этом его уникальность.

Здесь нужно сделать уточнение. Повторим, что если бы спонтанного нарушения симметрии не было, то W^\pm - и Z -бозоны были бы безмассовыми. Каждый из них имел бы две поляризации, как фотон. Итого, считая частицы с разными поляризациями разными, мы бы имели $2 \times 3 = 6$ типов W^\pm , Z -бозонов. В Стандартной модели W^\pm - и Z -бозоны массивные, каждый из них имеет три спиновых состояния, то есть три поляризации, итого $3 \times 3 = 9$ типов частиц – квантов полей

⁶⁶ Кварковый состав π^+ , π^- и π^0 -мезонов – это $u\bar{d}$, $d\bar{u}$ и комбинация из $u\bar{u}$ и $d\bar{d}$, соответственно.

⁶⁷ На всякий случай: Francois Englert, Robert Brout, Peter W. Higgs.

⁶⁸ На всякий случай: Yoichiro Nambu, Giovanni Jona-Lasinio, Валентин Григорьевич Вакс, Анатолий Иванович Ларкин, Jeffrey Gldstone.

⁶⁹ На всякий случай: Steven Weinberg, Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam.

W^\pm , Z . Спрашивается, откуда взялись три «лишних» типа квантов? Дело заключается в том, что в Стандартной модели необходимо ввести не одно, а четыре скалярных поля Энглера–Браута–Хиггса. Квант одного из них – это бозон Хиггса, новая частица, открытая в ЦЕРНе. А кванты трех других в результате спонтанного нарушения симметрии как раз и превращаются в три «лишних» кванта, имеющих у массивных W^\pm , Z -бозонов. Искать их бесполезно, они уже давно найдены, коль скоро известно, что W^\pm - и Z -бозоны имеют массу.

Эта арифметика, кстати, согласуется с тем, что все четыре поля Энглера–Браута–Хиггса – скалярные, их кванты имеют нулевой спин. Безмассовые W^\pm - и Z -бозоны имели бы проекции спина на направление движения, равные -1 и $+1$. Для массивных W^\pm - и Z -бозонов эти проекции принимают значения -1 , 0 и $+1$, то есть «лишние» кванты имеют нулевую проекцию. Три поля Энглера–Браута–Хиггса, из которых эти «лишние» кванты получаются, тоже имеют нулевую проекцию спина на направление движения, просто потому, что их вектор спина равен нулю. Всё сходится.

Итак, бозон Хиггса – это квант одного из четырех скалярных полей Энглера–Браута–Хиггса, существующих в Стандартной модели. Три других поедаются (научный термин!) W^\pm - и Z -бозонами, превращаясь в их третьи, недостающие спиновые состояния.

4 А действительно ли нужен новый бозон?

Самое удивительное в этой истории заключается в том, что сегодня мы понимаем: механизм Энглера–Браута–Хиггса – отнюдь не единственный возможный механизм нарушения симметрий в физике микромира и генерации масс элементарных частиц, а бозон Хиггса мог бы и не существовать. Этому нас учит, в частности, физика конденсированных сред (жидкостей, твердых тел). В ней имеется множество примеров спонтанного нарушения симметрии и разнообразие механизмов этого нарушения. И в большинстве случаев ничего похожего на бозон Хиггса в этих примерах нет.

Ближайшим твердотельным аналогом спонтанного нарушения симметрий Стандартной модели в вакууме является спонтанное нарушение внутренней симметрии электродинамики в толще сверхпроводника. Оно приводит к тому, что в сверхпроводнике фотон в определенном смысле обладает массой (как W^\pm - и Z -бозоны в вакууме). Проявляется это в эффекте Мейсснера – выталкивании магнитного поля из сверхпроводника. Фотон не хочет проникать внутрь сверхпроводника, где он становится массивным: ему там «тяжело», ему энергетически невыгодно там находиться (вспомните $E = mc^2$). Магнитное поле, которое можно несколько условно воспринимать как набор фотонов, обладает тем же свойством: оно в сверхпроводник не проникает. Это и есть эффект Мейсснера.

Эффективная теория сверхпроводимости – теория Гинзбурга–Ландау – чрезвычайно похожа на теорию Энглера–Браута–Хиггса (точнее наоборот: теория Гинзбурга–Ландау на 14 лет старше). В теории Гинзбурга–Ландау тоже есть скалярное поле, которое однородно «разлито» по сверхпроводнику и приводит к спонтанному нарушению симметрии. Однако теорию Гинзбурга–Ландау недаром называют эффективной: она ухватывает, образно говоря, внешнюю сторону явления, но совершенно неадекватна для понимания фундаментальных, микроскопических причин возникновения сверхпроводимости. Никакого скалярного поля в сверхпроводнике на самом деле нет, в нем есть электроны и кристаллическая решетка, а сверхпроводимость обусловлена особыми свойствами основного состояния системы электронов, возникающими благодаря взаимодействию между ними.

Не может ли подобная картина иметь место и в микромире? Не может ли быть так, что никакого фундаментального скалярного поля, «разлитого» в вакууме, нет, а спонтанное нарушение симметрий вызвано совершенно иными причинами? Если рассуждать чисто теоретически и не обращать внимания на экспериментальные факты, то ответ на этот вопрос – утвердительный. Примером может служить так называемая «модель техницвета», предложенная в 1979 году уже упоминавшимся Стивеном Вайнбергом и независимо Леонардом Сасскиндом⁷⁰. В ней нет никаких фундаментальных скалярных полей, нет и бозона Хиггса. Вместо этого есть много новых элементарных частиц, по своим свойствам напоминающих известные кварки. Взаимодействие между этими новыми частицами и приводит к спонтанному нарушению

⁷⁰ Leonard Susskind.

симметрий и генерации масс W^\pm - и Z -бозонов. С массами известных фермионов, например электрона, дело обстоит хуже, но и эту проблему можно решить за счет усложнения теории.

Внимательный читатель может задать вопрос: «А как же с аргументами раздела 3.3, говорящими, что нарушать симметрию должно именно скалярное поле?» Лазейка здесь в том, что это скалярное поле может быть **составным**, в том смысле, что соответствующие ему частицы-кванты не элементарны, но состоят из других, элементарных частиц.

Давайте вспомним в этой связи квантовомеханическое соотношение неопределенностей Гайзенберга $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$, где Δx и Δp – неопределенности координаты и импульса, соответственно. Одно из его проявлений состоит в том, что структура составных объектов с характерным внутренним размером Δx проявляется лишь в процессах, где участвуют частицы с достаточно высокими импульсами $p \geq \hbar/\Delta x$, а значит, с достаточно высокими энергиями. Здесь уместно напомнить о Резерфорде, который бомбардировал атомы электронами высоких по тем временам энергий и таким образом выяснил, что атомы состоят из ядер и электронов. Разглядывая атомы в микроскоп даже с самой совершенной оптикой (то есть используя свет – фотоны низких энергий), обнаружить, что атомы – составные, а не элементарные, точечные частицы, невозможно: не хватает разрешения.

Итак, при низких энергиях составная частица выглядит как элементарная. Для эффективного описания таких частиц при низких энергиях вполне можно считать, что они являются квантами некоторого поля. Если спин составной частицы равен нулю, то это поле будет скалярным.

Подобная ситуация реализуется, например, в физике π -мезонов, частиц со спином 0. До середины 60-х годов не было известно, что π -мезоны состоят из кварков и антикварков.⁷¹ Тогда π -мезоны описывались элементарными скалярными⁷² полями. Теперь мы знаем, что π -мезоны – составные частицы, но «старая» полевая теория π -мезонов остается в силе постольку, поскольку рассматриваются процессы при низких энергиях, рис. 6. Лишь при энергиях порядка 1 ГэВ и выше начинает проявляться кварковая структура π -мезонов, и эта теория перестает работать. Энергетический масштаб 1 ГэВ здесь появился не случайно: это масштаб сильных взаимодействий, связывающих кварки в π -мезоны, протон, нейтрон и т.д., это масштаб масс сильно-взаимодействующих частиц, например, протона. Отметим, что сами π -мезоны стоят особняком: по причине, о которой мы не будем здесь говорить, они имеют гораздо меньшие массы: $m_{\pi^\pm} = 140$ МэВ, $m_{\pi^0} = 135$ МэВ.

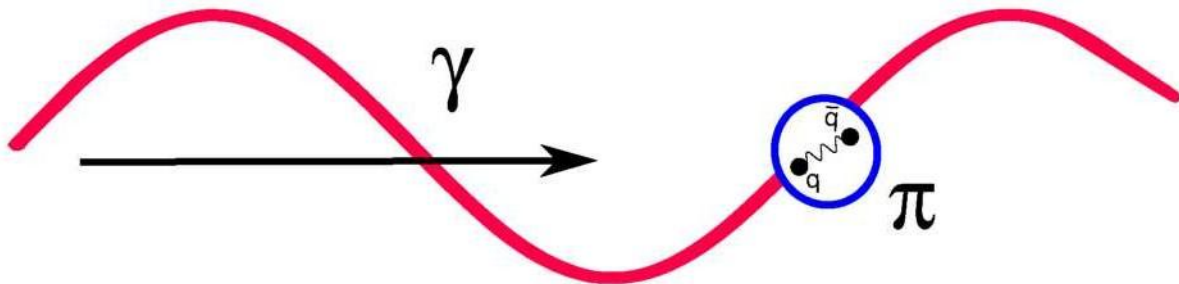


Рис. 6: Фотон большой длины волны, а значит низкой энергии, не способен разрешить кварк-антикварковую структуру π -мезона.

Итак, скалярные поля, ответственные за спонтанное нарушение симметрий, могут в принципе быть составными. Именно такая ситуация предполагается в модели техницвета. При этом три бесспиновых кванта, которые поедаются W^\pm - и Z -бозонами и становятся их недостающими спиновыми состояниями, имеют близкую аналогию с π^+ -, π^- и π^0 -мезонами. Только соответствующий энергетический масштаб – не 1 ГэВ, а несколько ТэВ. В такой картине ожидается существование множества новых составных частиц – аналогов протона, нейтрона и т.д. – с массами в области нескольких ТэВ. Сравнительно легкий бозон Хиггса в ней, наоборот, отсутствует. Еще одна особенность модели в том, что W^\pm - и Z -бозоны являются в ней отчасти

⁷¹ Кварковый состав π^+ -, π^- и π^0 -мезонов – это $u\bar{d}$ $d\bar{u}$ и комбинация из $u\bar{u}$ и $d\bar{d}$, соответственно.

⁷² Точнее, псевдоскалярными, но эта тонкость для нас несущественна.

составными частицами, поскольку, как мы сказали, некоторые их компоненты аналогичны π -мезонам.⁷³ Это должно было бы проявляться во взаимодействиях W^\pm - и Z -бозонов.

Именно последнее обстоятельство привело к тому, что модель техницвета (по крайней мере в ее изначальной формулировке) была отвергнута задолго до недавнего экспериментального обнаружения нового бозона: точные измерения свойств W^\pm - и Z -бозонов на LEP и SLC не согласуются с предсказаниями модели. Открытие же нового бозона окончательно поставило крест на модели техницвета. Красивая теория была разгромлена упрямыми экспериментальными фактами! Тем не менее мне, как и ряду других теоретиков, идея о составных скалярных полях представляется более привлекательной по сравнению с теорией Энглера–Браута–Хиггса, использующей элементарные скалярные поля. Конечно, после открытия в ЦЕРНе нового бозона идея о составленности оказалась в более трудном положении, чем раньше: если эта частица составная, она должна достаточно успешно мимикрировать под элементарный бозон Хиггса. И всё же поживем – увидим, что скажут по этому поводу эксперименты на Большом адронном коллайдере, в первую очередь более точные измерения свойств нового бозона.

5 Открытие сделано. Что дальше?

Вернемся, в качестве рабочей гипотезы, к минимальной версии теории – Стандартной модели с одним элементарным бозоном Хиггса. Поскольку в этой теории именно поле (точнее, поля) Энглера–Браута–Хиггса дает массы всем элементарным частицам, взаимодействие каждой из этих частиц с бозоном Хиггса жестко фиксировано. Чем больше масса частицы, тем сильнее взаимодействие; чем сильнее взаимодействие, тем более вероятен распад бозона Хиггса на пару частиц данного сорта. Распады бозона Хиггса на пары реальных частиц $t\bar{t}$, ZZ и W^+W^- запрещены законом сохранения энергии, который требует, чтобы сумма масс продуктов распада была меньше массы распадающейся частицы (опять вспоминаем $E = mc^2$), а у нас, напомним, $m_H \approx 125$ ГэВ, $m_t = 173$ ГэВ, $m_Z = 91$ ГэВ и $m_W = 80$ ГэВ. Следующим по массе стоит b -кварк с $m_b = 4$ ГэВ, и именно поэтому, как мы говорили, бозон Хиггса охотнее всего распадается на пару $b\bar{b}$. Интересен и распад бозона Хиггса на пару довольно тяжелых τ -лептонов $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ ($m_\tau = 1,8$ ГэВ); он должен происходить с вероятностью 6 % (это означает, что так распадаются 6 бозонов Хиггса из 100). Распад $H \rightarrow \mu^+\mu^-$ ($m_\mu = 106$ МэВ) должен происходить с еще меньшей, но всё еще неисчезающей вероятностью 0,02 %. Помимо обсуждавшихся выше распадов $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow 4l$ и $H \rightarrow 2l 2\nu$, отметим еще распад $H \rightarrow Z\gamma$, вероятность которого должна составлять 0,15 %. Все эти вероятности можно будет измерить на Большом адронном коллайдере, и любое отклонение от этих предсказаний будет означать, что наша рабочая гипотеза – Стандартная модель – неверна. И наоборот, согласие с предсказаниями Стандартной модели будет всё больше и больше убеждать нас в ее справедливости.

То же можно сказать и о рождении бозона Хиггса в столкновениях протонов на Большом адронном коллайдере. Бозон Хиггса может рождаться в одиночку, или вместе с парой легких кварков высоких энергий, или вместе с одним W - или Z -бозоном, или, наконец, вместе с парой $t\bar{t}$. Частицы, рождающиеся вместе с бозоном Хиггса, можно детектировать и отождествлять, поэтому разные механизмы рождения можно изучать на Большом адронном коллайдере по отдельности. Тем самым можно извлекать информацию о взаимодействии бозона Хиггса с W^\pm -, Z -бозонами и t -кварком.

Наконец, важным свойством бозона Хиггса является его взаимодействие с самим собой. Оно должно проявляться в процессе $H^* \rightarrow HH$, где H^* – виртуальная частица.⁷⁴ В Стандартной модели свойства этого взаимодействия тоже однозначно предсказываются. Впрочем, его изучение – дело отдаленного будущего.

⁷³ Такая возможность согласуется с тем, что W^\pm - и Z -бозоны имеют массы, малые по сравнению с новым энергетическим масштабом порядка нескольких ТэВ: как мы отмечали, π -мезоны тоже имеют малые массы по сравнению с адронным масштабом 1 ГэВ.

⁷⁴ Виртуальная частица отличается от реальной тем, что для реальной частицы выполняется обычное релятивистское соотношение между энергией и импульсом $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$, а для виртуальной – не выполняется. Такое возможно благодаря квантовомеханическому соотношению $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$ между неопределенностью энергии ΔE и длительностью процесса Δt . Поэтому виртуальная частица почти мгновенно распадается или аннигилирует с другой (ее время жизни Δt очень мало), а реальная живет заметно дольше или вообще стабильна.

Итак, на Большом адронном коллайдере имеется обширная программа исследования взаимодействий нового бозона. В результате ее выполнения станет более или менее ясно, описывается ли природа Стандартной моделью или мы имеем дело с какой-то другой, более сложной (а может быть и более простой) теорией. Дальнейшее продвижение связано с существенным повышением точности измерений; оно потребует строительства нового ускорителя – e^+e^- -коллайдера с рекордной для этого типа машин энергией. Очень может быть, что на этом пути нас поджидает масса сюрпризов.

6 Вместо заключения: в поисках «новой физики»

С «технической» точки зрения Стандартная модель внутренне непротиворечива. Это означает, что в ее рамках можно – хотя бы в принципе, а как правило и на практике – вычислить любую физическую величину (разумеется, относящуюся к тем явлениям, которые призвана описывать Стандартная модель)⁷⁵, и результат не будет содержать неопределенностей. Тем не менее, многие, хотя и не все, теоретики считают положение дел в Стандартной модели не вполне удовлетворительным, мягко говоря. И связано это в первую очередь с ее энергетическим масштабом.

Как ясно из предыдущего, энергетический масштаб Стандартной модели имеет порядок $M_{SM} = 100$ ГэВ (мы здесь не говорим о сильных взаимодействиях с масштабом 1 ГэВ, с этим масштабом всё проще). Это – масштаб масс W^\pm - и Z -бозонов и бозона Хиггса. Много это или мало? С экспериментальной точки зрения – немало, а вот с теоретической...

В физике имеется еще один масштаб энергий. Он связан с гравитацией и равен массе Планка $M_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ. При низких энергиях гравитационные взаимодействия между частицами пренебрежимо слабы, но они усиливаются с ростом энергии, и при энергиях порядка M_{Pl} гравитация становится сильной. Область энергий выше M_{Pl} – это область квантовой гравитации, что бы она из себя не представляла. Для нас важно, что гравитация – самое, пожалуй, фундаментальное взаимодействие, и гравитационный масштаб M_{Pl} – самый фундаментальный масштаб энергий. Почему же тогда масштаб Стандартной модели $M_{SM} = 100$ ГэВ так далек от $M_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ?

У обозначенной проблемы есть еще один, более тонкий аспект. Он связан со свойствами физического вакуума. В квантовой теории вакуум – основное состояние природы – устроен совсем нетривиально. В нем всё время рождаются и уничтожаются виртуальные частицы, иными словами, образуются и исчезают флуктуации полей. Непосредственно наблюдать эти процессы мы не можем, но они оказывают влияние на наблюдаемые свойства элементарных частиц, атомов и т.д. Например, взаимодействие электрона в атоме с виртуальными электронами и фотонами приводит к наблюдаемому в атомных спектрах явлению – лэмбовскому сдвигу. Другой пример – поправка к магнитному моменту электрона или мюона (аномальный магнитный момент), тоже обусловленная взаимодействием с виртуальными частицами. Эти и подобные эффекты вычислены и измерены (в указанных случаях с фантастической точностью!), так что мы можем быть уверены, что имеем правильную картину физического вакуума.

В этой картине **все** параметры, изначально закладываемые в теорию, получают поправки, связанные с взаимодействием с виртуальными частицами. Их называют радиационными поправками. В квантовой электродинамике эти поправки малы, а вот в секторе Энглера–Браута–Хиггса они огромны. Такова особенность элементарных скалярных полей, составляющих этот сектор; у других полей этого свойства нет. Главный эффект здесь состоит в том, что радиационные поправки стремятся «подтянуть» энергетический масштаб Стандартной модели M_{SM} к гравитационному масштабу M_{Pl} . Если оставаться в рамках Стандартной модели, то единственный выход – подобрать изначальные параметры теории так, чтобы вместе с радиационными поправками они приводили к правильному значению M_{SM} . При этом выясняется, что точность подгонки должна составлять величину, близкую к $M_{SM}^2/M_{Pl}^2 = 10^{-34}$! В этом и состоит второй аспект проблемы энергетического масштаба Стандартной модели: представляется неправдоподобным, что такая подгонка имеет место в природе.

⁷⁵ Стандартная модель на самом деле заведомо неполна, но это предмет отдельного разговора. Отметим только, что о ее неполноте свидетельствуют данные космологии – науки о Вселенной. Проявится ли неполнота Стандартной модели при энергиях Большого адронного коллайдера – открытый и интригующий вопрос.

Многие (хотя, повторим, не все) теоретики считают, что эта проблема однозначно свидетельствует о необходимости выхода за рамки Стандартной модели. Действительно, если Стандартная модель перестает работать или существенно расширяется на энергетическом масштабе M_{NP} , то аргумент о радиационных поправках модифицируется. Требуемая точность подгонки параметров в этом случае составляет, грубо говоря, M_{SM}^2/M_{NP}^2 , а на самом деле на пару порядков слабее. Если считать, что тонкой подстройки параметров в природе нет, то отсюда следует, что масштаб «новой физики» должен лежать в области 1–2 ТэВ, то есть как раз в области, доступной для исследования на Большом адронном коллайдере!

Какой могла бы быть «новая физика»? Единства у теоретиков по этому поводу нет. Один вариант – составная природа скалярных полей, обеспечивающих спонтанное нарушение симметрии. О нем мы говорили в разделе 4. Другая, тоже популярная (пока?) возможность – суперсимметрия. На ней мы останавливаться не будем; скажем только, что суперсимметрия предсказывает целый зоопарк новых частиц с массами в области сотен ГэВ – нескольких ТэВ. Обсуждаются и весьма экзотические варианты вроде дополнительных измерений пространства.

Несмотря на все усилия, до сих пор никаких экспериментальных указаний на «новую физику» получено не было. Это, вообще-то, уже начинает внушать тревогу: а правильно ли мы всё понимаем? Вполне возможно, впрочем, что мы еще не добрались до «новой физики» по энергии и по количеству набранных данных, и что именно с ней будут связаны новые, революционные открытия. Основные надежды здесь возлагаются опять-таки на Большой адронный коллайдер, который через полтора года начнет работать на полную энергию 13–14 ТэВ и быстро набирать данные. Следите за новостями!

7 Приложение. Коллайдеры высоких энергий.

Коллайдер – ускоритель со встречными пучками частиц, в котором частицы сталкиваются «лоб в лоб». В электрон-позитронных коллайдерах (другое название – e^+e^- -коллайдеры) сталкиваются электроны и позитроны. До настоящего времени были созданы также протон-антипротонные, протон-протонные, электрон-протонные и ядро-ядерные (или тяжелоионные) коллайдеры. Остальные возможности, например, $\mu^+\mu^-$ -коллайдер, пока только обсуждаются. Среди всех типов коллайдеров основными для физики элементарных частиц являются протон-антипротонные, протон-протонные и электрон-позитронные. Некоторые из них перечислены ниже. О различиях между протон-антипротонными и протон-протонными коллайдерами, с одной стороны, и электрон-позитронными коллайдерами с другой см. в конце этого приложения.

Большой адронный коллайдер – протон-протонный, он ускоряет два пучка протонов друг навстречу другу.⁷⁶ Проектная энергия протонов в каждом из пучков составляет 7 ТэВ, так что полная проектная энергия столкновения – 14 ТэВ. В 2011 году Большой адронный коллайдер работал на половине этой энергии, т.е. полная энергия столкновения составляла 7 ТэВ, а в 2012 году – на полной энергии 8 ТэВ. Большой адронный коллайдер представляет собой кольцо длиной 27 км, в котором протоны ускоряются и удерживаются магнитным полем, создаваемым сверхпроводящими магнитами. Столкновения протонов происходят в четырех местах, где расположены детекторы, регистрирующие частицы, рождающиеся в этих столкновениях. Два из этих детекторов – ATLAS и CMS – предназначены для исследований в области физики элементарных частиц при высоких энергиях, а два других – LHCb и ALICE – для исследований частиц, в составе которых имеются b -кварки, и для исследований горячей и плотной кварк-глюонной материи, соответственно.

Предыдущие коллайдеры наиболее высоких энергий:

$Spp\bar{S}$ – протон-антипротонный коллайдер в ЦЕРНе. Длина кольца – 6,9 км, максимальная энергия столкновения – 630 ГэВ. Работал с 1981 по 1990 год.

LEP – кольцевой электрон-позитронный коллайдер с максимальной энергией столкновения 209 ГэВ, расположенный в том же туннеле, что и Большой адронный коллайдер. Работал с 1989 по 2000 год.

SLC – линейный электрон-позитронный коллайдер в SLAC, США. Энергия столкновения – 91 ГэВ (масса Z -бозона). Работал с 1989 по 1998 год.

⁷⁶ Предусмотрена и его работа как тяжелоионного коллайдера, но это к теме статьи отношения не имеет.

Tevatron – кольцевой протон-антипротонный коллайдер в Fermilab, США. Длина кольца 6 км, максимальная энергия столкновения – 2 ТэВ. Работал с 1987 по 2011 год.

Сравнивая протон-протонные и протон-антипротонные коллайдеры с электрон-позитронными, нужно иметь в виду, что протон – составная частица, он содержит в себе кварки и глюоны. Каждый из этих кварков и глюонов несет лишь часть энергии протона. Поэтому в случае Большого адронного коллайдера, например, энергия элементарного столкновения (между двумя кварками, между двумя глюонами или кварка с глюоном) заметно ниже суммарной энергии сталкивающихся протонов (14 ТэВ при проектных параметрах). Из-за этого область энергий, доступных для изучения на Большом адронном коллайдере, достигает «всего» 2–4 ТэВ, в зависимости от изучаемого процесса. Такой особенности у электрон-позитронных коллайдеров нет: электрон – элементарная частица.

Плюс протон-протонных (и протон-антипротонных) коллайдеров в том, что даже с учетом этой особенности достичь высоких энергий столкновений на них технически проще, чем на электрон-позитронных. Есть и минус. Из-за составной структуры протона, а также из-за того, что кварки и глюоны взаимодействуют между собой гораздо сильнее, чем электроны с позитронами, в столкновениях протонов происходит гораздо больше событий, не имеющих интереса с точки зрения поиска бозона Хиггса или других новых частиц и явлений. Интересные же события выглядят в протонных столкновениях более «грязными», в них рождается много «посторонних», неинтересных частиц (столкните кирпич с кирпичом и попробуйте узнать, нет ли среди осколков чего-нибудь интересного). Всё это создает «шум» (фон), выделить из которого сигнал в случае протон-протонных коллайдеров сложнее, чем в случае электрон-позитронных. Соответственно, ниже и точность измерений. Из-за этих плюсов–минусов протон-протонные (и протон-антипротонные) коллайдеры называют машинами открытий, а электрон-позитронные – машинами точных измерений.