

*рук., Турдумбаев К.Т., Марат Сейтек
Кыргызский государственный технический университет
им И.Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика
E-mail: mr.seytek@mail.ru*

В данной работе рассматривается причина нарушения электрослабой симметрии и указывается какой механизм отвечает за это нарушение и каким образом он действует.

Бозон Хиггса – гипотетическая массивная бесспиновая частица, квант соответствующего (хиггсовского) поля, возникающего в теоретических моделях со спонтанным нарушением симметрии (в том числе и в Стандартной модели) и ответственного за возникновение масс у элементарных частиц.

Помимо полей, "ответчающих" за тройку фундаментальных взаимодействий (электромагнитное, сильное и слабое), в Стандартной модели предполагается наличие еще одного скалярного поля, которое неотделимо от пустого пространства, не совпадает с гравитационным и называется полем Хиггса (Хиггс в свое время выдвинул гипотезу, что пространство между частицами как бы заполнено тяжелой, вязкой субстанцией). Считается, что все фундаментальные частицы приобретают массу в результате взаимодействия с этим вездесущим полем. Те из них, которые сильно взаимодействуют с полем Хиггса, являются тяжелыми частицами, а слабо взаимодействующие – легкими. Этот эффект аналогичен эффекту движения тела в вязкой жидкости, когда оно за счет взаимодействия с жидкостью приобретает дополнительную эффективную массу. В силу корпускулярно-волнового дуализма полю Хиггса должна соответствовать, по крайней мере, одна частица – квант этого поля, называемая

частицей Хиггса или хиггсовским бозоном. Считается, что хиггсовский бозон имеет нулевой спин.

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. 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 соответствует закон сохранения энергии, симметрии относительно сдвигов в пространстве — закон сохранения импульса. И 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 здесь ни при чем. Тем не менее, необходимая 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 употребляют термин «калибровочная инвариант-

ность») объясняет и тот факт, что у фотона нет массы.

Частицы с целым спином 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 с единичным спином — электрически заряженные W^+W^- -бозоны и нейтральный Z -бозон.

Ну а частица Хиггса должна иметь нулевой спин.

Вернемся к свойствам частиц со спином. Массивная частица со спином s (в единицах \hbar) имеет $(2s + 1)$ состояний с разными проекциями спина на заданную ось (спин — это вектор, так что понятие его проекции на заданную ось имеет обычный смысл). Например, спин электрона 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, где такая частица покоится, нельзя. Тем не менее, можно говорить о 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!

Ключевыми для нас являются, однако, не фотоны, а W^\pm - и Z -бозоны. Эти частицы, открытые в 1983 году и задолго до этого предсказанные теоретиками, обладают спином 1 и довольно большой массой: W^\pm -бозоны имеют массу 80 ГэВ, а Z -бозон имеет массу 91 ГэВ. Свойства W^\pm - и Z -бозонов сейчас хорошо известны, в основном благодаря экспериментам на электрон-позитронном и протон-антипротонном коллайдерах. 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 — это β -распады мюона, нейтрона и 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 вза-

имодействует 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 к закону сохранения электрического заряда. 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 со спином 1 действительно работает в случае фотона, а в случае W^\pm - и Z -бозонов этот запрет 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. А 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 летает со скоростью света и может иметь спин, направленный вдоль направления движения или против него. Так же, как и для фотона, в первом случае имеет смысл говорить об электроне с правой поляризацией или, короче, о правом электроне, во втором — о левом электроне. Поскольку мы хорошо знаем, как устроены электромагнитные и слабые взаимодействия (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. 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 электронов 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 фермио-

нами 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. Если это взаимодействие 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 как левый⁴. Соответственно, и z -заряд его 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. При чем 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. Говоря о связи симметрии 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 микроскопи-

ческие 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. Соответственно, движение электрона вдоль магнитного поля происходит по прямой, поперек поля — по окружности, а в общем случае — по спирали. 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.

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 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 не намагниченным.

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 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. 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 самой низкой 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, 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 со спином 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 со спином 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 частиц теорети-

ками из Брюсселя Франсуа Энглером и Робертом Браутом и чуть позже физиком из Эдинбурга Питером Хиггсом. Произошло это в 1964 году. Они опирались на представление о спонтанном нарушении симметрии (но в теориях без векторных полей, т. е. без частиц со спином 1), которое было введено в физику элементарных частиц в 1960–1961 годах в работах Й. Намбу, Й. Намбу и Дж. Йона-Лазинио, В. Г. Вакса и А. И. Ларкина, Дж. Голдстоуна. (Й. Намбу, совместно с М. Кобаяши и Т. Маскава, получил за это Нобелевскую премию в 2008 году.) В отличие от предыдущих авторов, Энглера, Браута и Хиггса рассмотрели теорию (в то время умозрительную), в которой присутствует как скалярное (спин 0), так и векторное (спин 1) поле. 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 со спином 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. Все 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 и разных типов фермионов. Последний шаг на самом деле весьма нетривиален; за формулировку полной теории слабых и электромагнитных взаимодействий Стивен Вайнберг, Шелдон Ли Глэшоу и Абдус Салам получили в 1979 году Нобелевскую премию.

Вернемся в 1964 год. Для исследования свойств своей теории Энглера и Браута использовали довольно вычурный по сегодняшним меркам подход. Наверное поэтому они не заметили, что наряду с массивной частицей со спином 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 было отмечено в начале статьи, такая терминология представляется не вполне корректной: ключевое предложение использовать скалярное поле для спонтанного нарушения симметрии и генерации масс частиц со спином 1 впервые сделали всё же Энглера и Браута. 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 безмассовы-

ми. Каждый из трех бозонов W^+ , W^- , Z имел бы две поляризации, как фотон. Итого, считая частицы с разными поляризациями разными, мы бы имели $2 \times 3 = 6$ типов W^\pm - и 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. 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 полей в результате спонтанного нарушения симметрии как раз и превращаются в три «лишних» кванта, имеющихся у массивных W^\pm , Z -бозонов. Искать их бесполезно, они уже давно найдены, коль скоро известно, что W^\pm - и Z -бозоны имеют массу: три «лишних» спиновых состояния W^+ , W^- и Z -бозонов — это они и есть.

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 име-

ют 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 W^\pm - и Z -бозонами, превращаясь в их третьи, недостающие спиновые состояния.

Литература

1. Базовые сведения о хиггсовском механизме в книге Л. Б. Окуня «Физика элементарных частиц» (на уровне слов и картинок) и «Лептоны и кварки» (на серьезном, но доступном уровне).
2. S. Dawson. Introduction to Electroweak Symmetry Breaking // hep-ph/9901280 — 83-страничные лекции про хиггсовский механизм и свойства хиггсовского бозона в Стандартной модели и в суперсимметричных теориях.
3. C. Quigg. Spontaneous symmetry breaking as a basis of particle mass // Rep. Prog. Phys. 70 1019–1053 (2007); статья в свободном доступе.
4. <http://elementy.ru/>