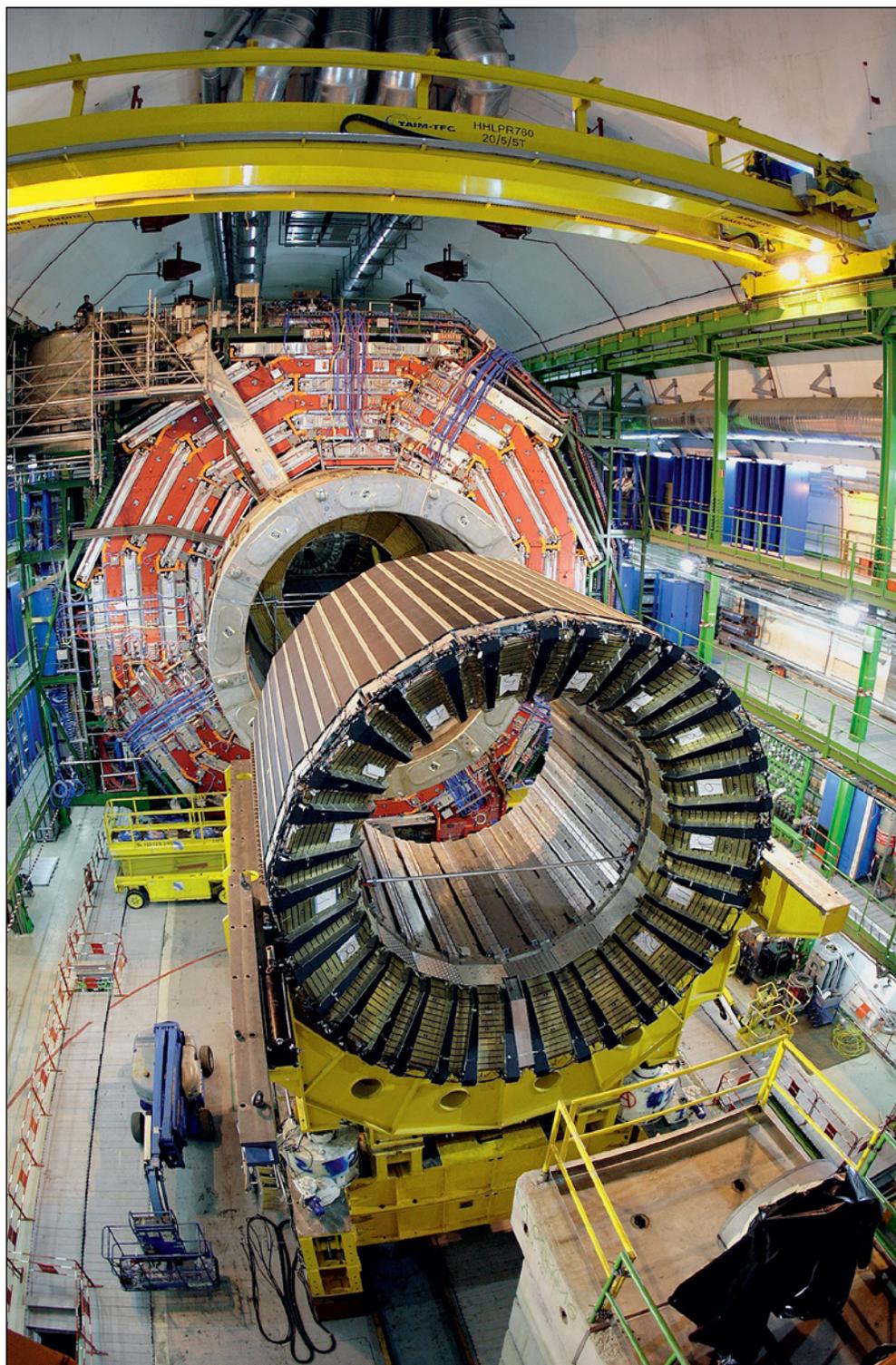


ДОЛГОЖДАННОЕ ОТКРЫТИЕ:



Академик Валерий РУБАКОВ, Институт ядерных исследований РАН и Московский государственный университет.

Четвёртого июля 2012 года произошло событие, имеющее выдающееся значение для физики: на семинаре в ЦЕРНе (Европейском центре ядерных исследований) было объявлено об открытии новой частицы, которая, как осторожно заявляют авторы открытия, по своим свойствам соответствует теоретически предсказанному элементарному бозону Стандартной модели физики элементарных частиц. Его обычно называют бозоном Хиггса, хотя это название не вполне адекватно. Как бы то ни было, речь идет об открытии одного из главных объектов фундаментальной физики, не имеющего аналогов среди известных элементарных частиц и занимающего уникальное место в физической картине мира (см. «Наука и жизнь» № 1, 1996 г., статья «Бозон Хиггса необходим!»).

ЧТО БЫЛО НА СЕМИНАРЕ И ДО НЕГО

Объявление о семинаре было сделано в конце июня, и сразу стало ясно, что будет он неординарным. Дело в том, что первые указания на существование нового бозона получили ещё в декабре 2011 года в экспериментах ATLAS и CMS, проводимых на Большом адронном коллайдере (LHC — Large Hadron Collider) в ЦЕРНе. Кроме того, незадолго до семинара появилось сообщение, что данные экспериментов на протон-антипротонном коллайдере Tevatron (Fermilab, США) также указывают на существование нового бозона. Всего этого было ещё недостаточно, чтобы говорить об открытии. Но с декабря количество данных, набранных на LHC, удвоилось и методы их обработки стали совершеннее. Результат оказался впечатляющим: в каждом из экспериментов ATLAS и CMS по отдельности статистическая достоверность сигнала достигла величины, которая в физике элементарных частиц считается уровнем открытия (пять стандартных отклонений — см. словарь).

Семинар прошёл в праздничной атмосфере. Помимо исследователей, работающих в ЦЕРНе, и студентов, занимающихся там по летним программам, его «посетили» с помощью интернета участники крупнейшей конференции по физике высоких энергий, которая как раз в этот же день открылась в Мельбурне. Семинар транслировали по интернету в научные центры и университеты всего мира, включая, конечно, Россию. После впечатляющих выступлений руководителей 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 такое «у нас в руках» и зачем его придумали теоретики?

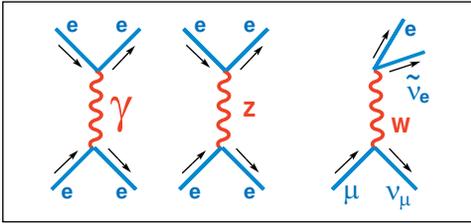
ЧТО ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ НОВАЯ ЧАСТИЦА

Минимальная версия теории микромира носит неуклюжее название Стандартной модели. Она включает все известные элементарные частицы (мы их перечислим ниже) и все известные взаимодействия между ними. Гравитационное взаимодействие стоит особняком: оно не зависит от типов элементарных частиц, а описывается общей теорией относительности Эйнштейна. Бозон Хиггса оставался 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 — частица элементарная, а не составная (о других возможностях речь пойдёт ниже). Большинство аспектов Стандартной модели — за исключением нового сектора, к которому принадлежит

Элементарные частицы Стандартной модели. Почти все они имеют свои античастицы, которые обозначают символом с тильдой сверху.

		ФЕРМИОНЫ				
КВАРКИ		u ВЕРХНИЙ	c ОЧАРОВАННЫЙ	t ИСТИННЫЙ	γ ФОТОН	
		d НИЖНИЙ	s СТРАННЫЙ	b ПРЕЛЕСТНЫЙ	Z Z-БОЗОН	
ЛЕПТОНЫ		e ЭЛЕКТРОН	μ МЮОН	τ ТАУ	W W-БОЗОН	ПЕРЕНОСИЧИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
		ν_e ЭЛЕКТРОННОЕ НЕЙТРИНО	ν_μ МЮОННОЕ НЕЙТРИНО	ν_τ ТАУ-НЕЙТРИНО	g ГЛЮОН	
					H БОЗОН ХИГГСА	



Взаимодействия в микромире. Электромагнитное взаимодействие происходит за счёт излучения и поглощения фотонов (а). Слабые взаимодействия имеют сходную природу: они обусловлены излучением, поглощением или распадом Z-бозонов (б) или W-бозонов (в), когда меняется также тип фермиона. На (в) показан процесс бета-распада мюона: $\mu \rightarrow e \nu$. ν путём рождения и распада W-бозона. Аналогичным образом происходит бета-распад нейтрона и некоторых атомных ядер.

бозон Хиггса, — проверены в многочисленных экспериментах, и главная задача в программе работ LHC — выяснить, действительно ли в природе реализуется минимальный вариант теории и насколько полно она описывает микромир¹.

В ходе выполнения этой программы и была открыта новая частица, довольно тяжёлая 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. Единицей энергии служит электронвольт (эВ) — энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов 1 вольт, и его производные — МэВ (миллион, 10^6 эВ), ГэВ (миллиард, 10^9 эВ), ТэВ (триллион, 10^{12} эВ). Масса электрона в этих единицах равна 0,5 МэВ, протона — примерно 1 ГэВ, самой тяжёлой известной элементарной частицы, *t*-кварка, — 173 ГэВ. Так вот, **масса новой частицы составляет 125—126 ГэВ** (неопределённость связана с погрешностью измерений). Назовём эту новую частицу *H*.

Она не имеет электрического заряда. Она нестабильна и может распадаться по-разному. На Большом адронном коллайдере ЦЕРНа её открыли, изучая распады на два фотона, $H \rightarrow \gamma\gamma$ и на две пары электрон-позитрон и/или мюон-антимюон, $H \rightarrow e^+e^-e^+e^-$, $H \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$, $H \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$. Второй тип процессов записывают как $H \rightarrow 4\ell$, где ℓ обозначает одну из частиц e^+ , e^- , μ^+ или μ^- (их называют лептонами). И CMS, и ATLAS сообщают также о некотором избытке событий, который можно объяснить

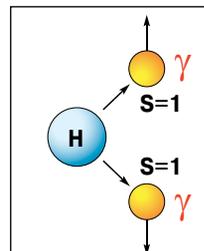
распадами $H \rightarrow 2\ell 2\nu$, где ν — нейтрино. Этот избыток, впрочем, пока не имеет высокой статистической достоверности.

Вообще всё, что сейчас известно о новой частице, согласуется с её 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 и тем самым предсказать число ожидаемых событий. Предсказания хорошо подтверждаются экспериментами, но, конечно, в пределах погрешностей. Экспериментальные погрешности ещё велики, да и измеренных величин пока совсем немного. Тем не менее трудно сомневаться, что открыт именно бозон Хиггса или что-то очень похожее на него, особенно если учесть, что указанные распады должны быть очень редкими: на два фотона распадаются 2 из 1000 бозонов Хиггса, а на 4ℓ — 1 из 10 000.

Более чем в половине случаев бозон Хиггса должен распадаться на пару *b*-кварк — *b*-антикварк: $H \rightarrow b\bar{b}$. Рождение пары $b\bar{b}$ в протон-протонных (и протон-антипротонных) столкновениях — явление очень частое и без всякого бозона Хиггса, и выделить сигнал от него из этого «шума» (физики говорят — фона) в экспериментах на LHC пока не удалось. Это отчасти получилось на коллайдере Tevatron, и, хотя статистическая достоверность там заметно ниже, эти данные также согласуются с предсказаниями Стандартной модели.

Все элементарные частицы обладают спином — внутренним угловым моментом. Спин частицы может быть целым (включая нуль) или полуцелым в единицах постоянной Планка \hbar . Частицы с целым спином называются бозонами, с полуцелым — фермионами. Спин электрона равен $1/2$, спин фотона — 1. Из анализа продуктов распада

Бозон Хиггса H (спин 0) распадается на два фотона (спин 1), спины которых антипараллельны и в сумме дают 0.



¹ Стандартная модель на самом деле заведомо неполна, но это предмет отдельного разговора. Отметим только, что о её неполноте свидетельствуют данные космологии — науки о Вселенной. Проявится ли неполнота Стандартной модели при энергиях LHC — вопрос пока открытый и интригующий.

СИММЕТРИИ, ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ И ЗАПРЕТЫ

новой частицы следует, что её спин целый, то есть это бозон. Из сохранения углового момента в распаде частицы на пару фотонов $H \rightarrow \gamma\gamma$ следует: спин каждого фотона целый; целым всегда остаётся и полный угловой момент у конечного состояния (пары фотонов). Значит, и у начального состояния он тоже целый.

Кроме того, он не равен единице: частица спина 1 не может распадаться на два фотона со спином 1. Остаётся спин 0; 2 или больше. Хотя спин новой частицы ещё не измерен, крайне маловероятно, что мы имеем дело с частицей спина 2 или больше. Почти наверняка спин H равен нулю, и, как мы увидим, именно таким должен быть бозон Хиггса.

Заканчивая описание известных свойств новой частицы, скажем, что живёт она по меркам физики микромира довольно долго. На основе экспериментальных данных оценка снизу её времени жизни даёт $T_H > 10^{-24}$ с, что не противоречит предсказанию Стандартной модели: $T_H = 1,6 \cdot 10^{-22}$ с. Для сравнения: время жизни t -кварка $T_t = 3 \cdot 10^{-25}$ с. Отметим, что прямое измерение времени жизни новой частицы на ЛНС вряд ли возможно.

ЗАЧЕМ ЕЩЁ ОДИН БОЗОН?

В квантовой физике каждая элементарная частица служит 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, можно переформулировать так:

Зачем нужно новое поле и каковы его ожидаемые свойства?

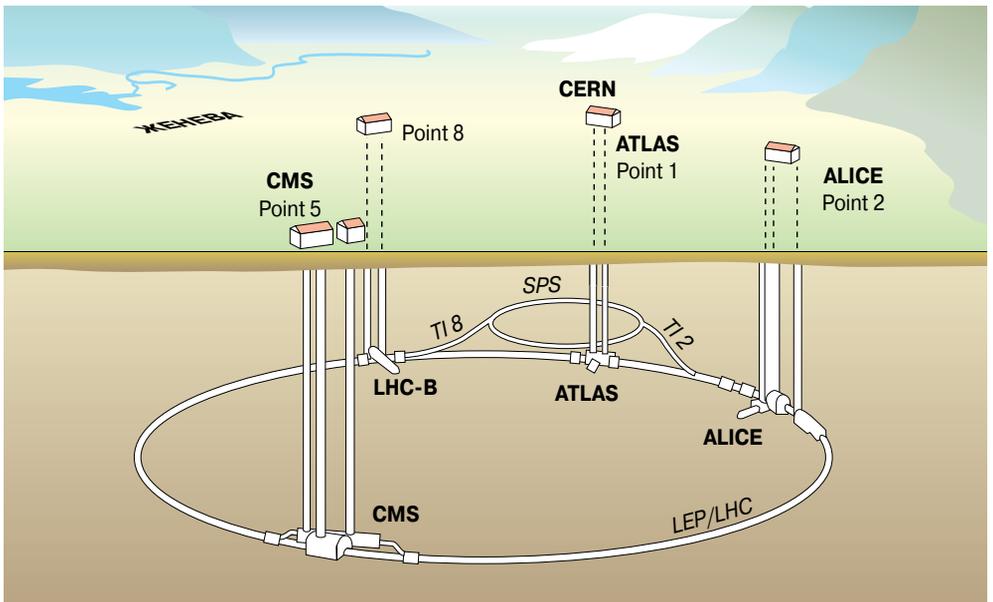
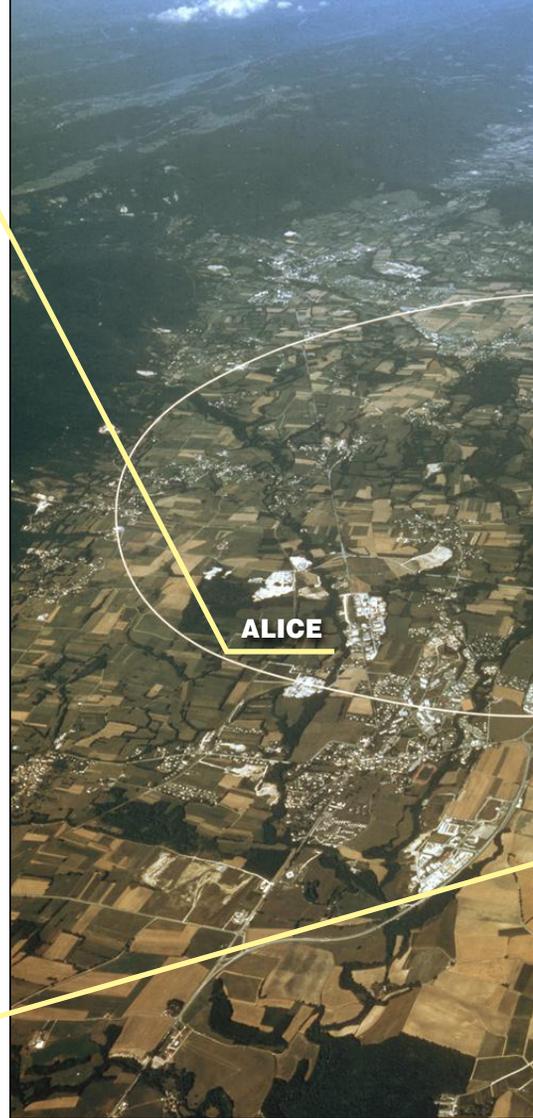
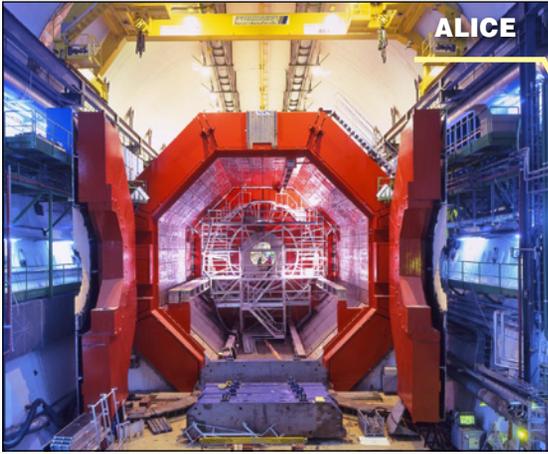
Краткий ответ состоит в том, что симметрии теории микромира — будь то Стандартная модель или какая-то более сложная теория — запрещают элементарным частицам иметь массу, а новое поле нарушает эти симметрии и обеспечивает существование масс частиц. В Стандартной модели — простейшем варианте теории (но 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.

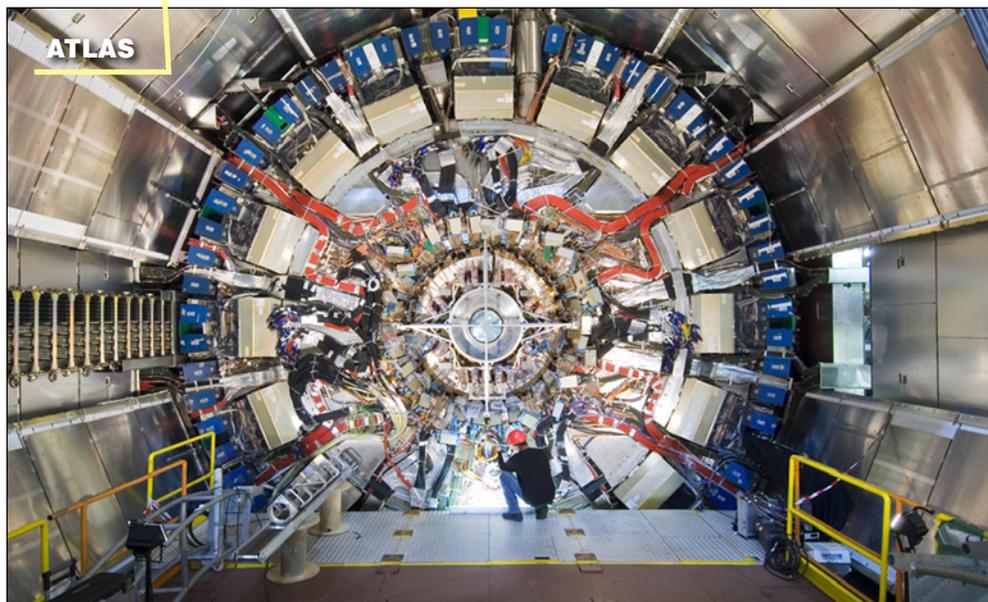
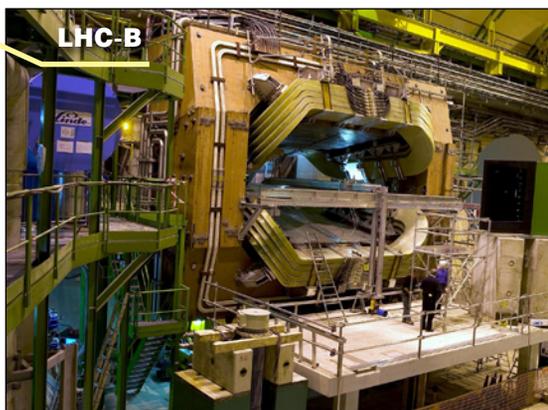
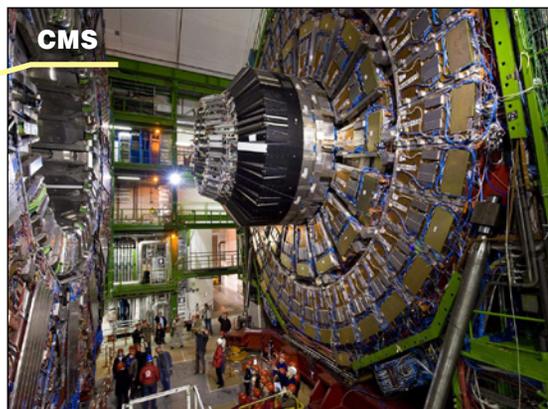
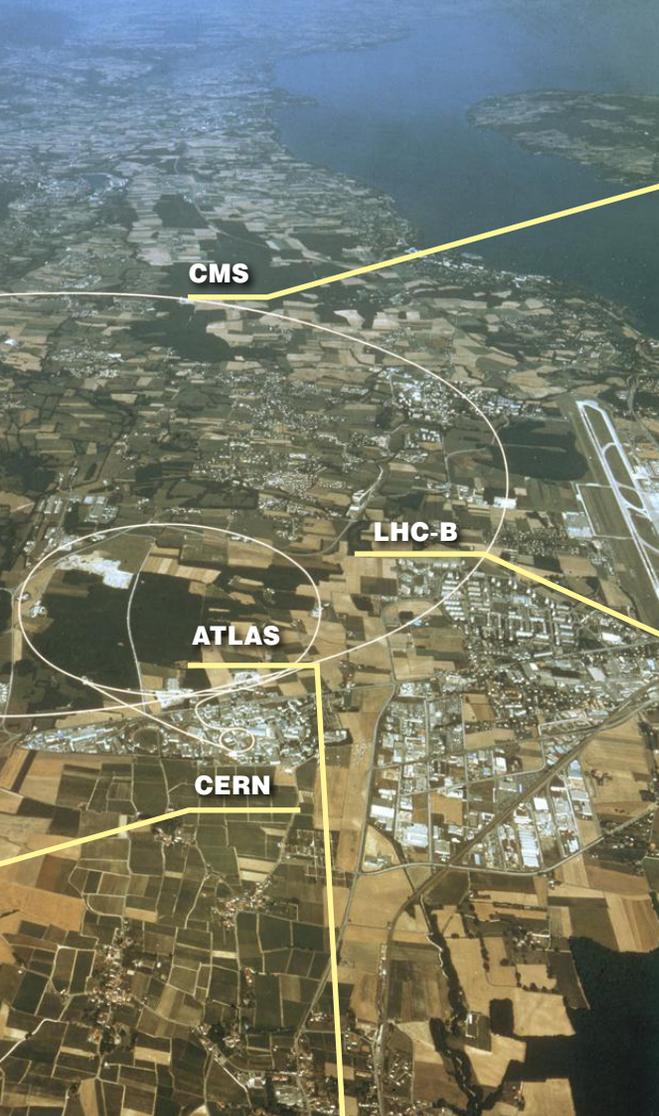
Рассмотрим, хотя бы в общих чертах, роль симметрии в физике микромира.

Общим свойством физических теорий, будь то ньютоновская 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 (то есть 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 нём (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 её эволюции.

И наоборот: каждому закону сохранения соответствует своя симметрия; это утверждение абсолютно точно и 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 чём. Тем не менее 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 инвариантность») объясняет, почему у фотона нет массы. Отсутствие массы у фотона, в свою очередь, тесно связано с тем, что у света есть поляризация только двух типов — левая и правая.

Чтобы пояснить связь между наличием только двух типов поляризации света и отсутствием массы у фотона, отвлечёмся на время от разговора о симметриях и снова напомним, что элементарные частицы характеризуются спином, полуцелым или целым в единицах постоянной Планка \hbar . Элементарные фермионы (частицы полуцелого спина) имеют спин $1/2$. Это электрон e , электронное нейтрино ν_e , тяжёлые 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^+ , электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$, антикварк \bar{u} и т.д.). Кварки u и d — лёгкие, и из них состоят протон





(кварковый состав uud) и нейтрон (udd). Остальные кварки (c, t, s, b) более тяжёлые; они входят в состав короткоживущих частиц, например, K -мезонов.

К бозонам, частицам целого спина, относятся не только фотон, но и его отдалённые аналоги — глюоны (спин 1). Глюоны отвечают за взаимодействия между кварками и связывают их в протон, нейтрон и другие составные частицы. Кроме того, есть ещё три частицы спина 1 — электрически заряженные W^+ , W^- — бозоны и нейтральный Z -бозон, речь о которых впереди. Ну а бозон Хиггса, как уже говорилось, должен иметь нулевой спин. Теперь мы перечислили все элементарные частицы, имеющиеся в Стандартной модели.

Массивная частица спина s (в единицах \hbar) имеет $2s + 1$ состояний с разными проекциями спина на заданную ось (спин — внутренний угловой момент — 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, допустим, 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 отсчёта, где такая частица покоится, нельзя. Тем не менее можно говорить о её спиральности — проекции спина на направление движения. Так вот, хотя спин фотона равен единице, таких проекций только две — по направлению движения и против него. Это и есть правая и левая поляризации света (фотонов). 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!**

ЧТО-ТО НЕ ТАК

Интерес для нас представляют, 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 довольно большой массой: W^\pm -бозоны имеют массу 80 ГэВ (примерно в 80 раз тяжелее протона), а Z -бозон — 91 ГэВ. Свойства W^\pm - и Z -бозонов хорошо известны в основном благодаря экспериментам на электрон-позитронных

коллайдерах LEP (ЦЕРН) и SLC (SLAC, США) и протон-антипротонном коллайдере Tevatron (Fermilab, США): точность измерений целого ряда величин, относящихся к W^\pm - и Z -бозонам, лучше 0,1%. Их свойства, и других частиц тоже, прекрасно описывает Стандартная модель. Это относится и к взаимодействиям W^\pm - и Z -бозонов с электронами, нейтрино, кварками и другими частицами. Такие взаимодействия, кстати, называют слабыми. Они детально изучены; один из давно известных примеров их проявления — бета-распады мюона, нейтрона и ядер.

Как уже говорилось, каждый из W^\pm - и Z -бозонов может находиться в трёх спиновых состояниях, а не в двух, как фотон. Однако они взаимодействуют с фермионами (нейтрино, кварками, электронами и т.д.) в принципе так же, как фотоны. Например, фотон взаимодействует с электрическим зарядом электрона и электрическим током, создаваемым движущимся электроном. Точно так же Z -бозон взаимодействует с неким зарядом электрона и током, возникающим при движении электрона, только эти заряд и ток имеют неэлектрическую природу. С точностью до важной особенности, о которой пойдёт вскоре речь, аналогия будет полной, если помимо электрического заряда электрону приписать ещё и Z -заряд. Своими Z -зарядами обладают и кварки, и нейтрино.

Аналогия с электродинамикой простирается ещё дальше. Как и теория фотона, теория W^\pm - и Z -бозонов обладает глубокой внутренней симметрией, близкой к той, которая приводит к закону сохранения электрического заряда. В полной аналогии с фотоном она 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 для фотона работает, а для W^\pm - и Z -бозонов нет!

Дальше — больше. Слабые взаимодействия электронов, нейтрино, кварков и других частиц с W^\pm - и Z -бозонами происходят так, как если бы эти фермионы не имели массы! Число поляризаций здесь ни при чём: и у массивных, и у безмассовых фермионов поляризаций (направлений спина) 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 летает со скоростью света и может иметь спин, направленный либо по направлению дви-

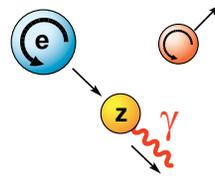
жения, либо против него. Как и для фотона, в первом случае имеет смысл говорить об электроне с правой поляризацией, или, короче, о правом электроне, во втором — о левом.

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. Это 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 нём вообще не участвует. Третья важная особенность, о которой мы обмолвились ранее, в этой картине та, что **Z-заряды левого и правого электрона различны**, и левый электрон взаимодействует с Z-бозоном сильнее, чем правый. Аналогичные свойства имеются и у мюона, и у тау-лептона, и у кварков.

Подчеркнём, 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 и, в частности, что «левый» и «правый» Z-заряды различны. В этом мире левые и правые электроны — частицы разные, и дело с концом: нас же не удивляет, например, что электрон и нейтрино имеют разные электрические заряды: -1 и 0 .

Включив массу электрона, мы немедленно придём к противоречию. Быстрый 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 же². Если его



При излучении фотона или испускании Z-бозона быстрым электроном проекция его спина на направление движения не меняется. Круглой стрелкой показано внутреннее вращение электрона.

взаимодействие связано с Z-зарядом, то значение Z-заряда у него «левое», такое же, как у левого электрона из воображаемого мира. Однако скорость массивного электрона всё-таки меньше скорости света, и всегда можно перейти в систему отсчёта, движущуюся ещё 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 станет выглядеть как правый, а не левый³. Соответственно и его Z-заряд должен быть таким же, как у правого электрона из воображаемого мира. Но такого не может быть: значение заряда не должно зависеть от системы отсчёта. Противоречие налицо. Подчеркнём, что мы пришли к нему, предполагая, что Z-заряд сохраняется; иначе о его значении для данной частицы и говорить не приходится.

Это противоречие показывает, что симметрии Стандартной модели (для определённости 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. Но при чём 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 имели бы нулевые массы. Но в реальном мире массы у них есть, а значит, с симметриями Стандартной модели что-то должно происходить.

² В реальном мире для ограниченного (но только ограниченного!) круга процессов так оно и есть. Например, взаимодействие быстрого массивного электрона, спин которого направлен против направления движения, с *покоящейся* или *медленно движущейся* мишенью (скажем, атомным ядром), практически не отличается от взаимодействия левого безмассового электрона.

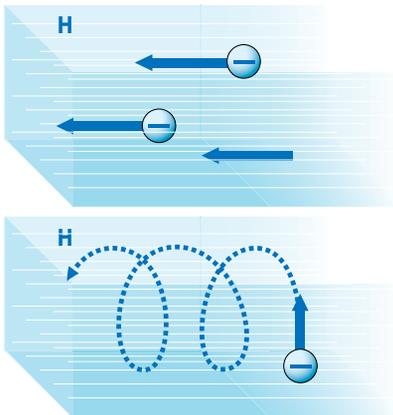
³ Противоречия с утверждением, сделанным в предыдущей сноске, здесь нет: мишень, покоящаяся в старой системе отсчёта, теперь движется быстрее электрона, и в реальном мире взаимодействие электрона с подобной мишенью существенно отличается от взаимодействия с покоящейся мишенью.

НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ

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 может присутствовать магнитное поле, направленное в какую-то сторону; тогда образец представляет собой магнит. Если бы существовали микроскопические существа, живущие внутри него, они бы обнаружили, что не все направления пространства равноправны. На электрон, летящий поперёк магнитного поля, действует сила Лоренца со стороны магнитного поля, а на электрон, летящий вдоль него, сила не действует. Электрон вдоль магнитного поля движется по прямой, поперёк 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 предпочтительнее другого. Исходная симметрия относительно вращений по-прежнему имеется

В однородном магнитном поле электрон движется по прямой вдоль поля и по спирали в любом другом направлении.



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 нём в конце концов окажется образец железа, даже если изначально он был ненамагниченным.

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 энергетически наиболее выгодно. Из приведённого примера ясно, что если симметрия спонтанно нарушена, то вытекающие из неё 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 явной, ненарушенной остаётся 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 действительно ли пространство несимметрично относительно вращений?» Изучив движение электронов и построив соответствующую теорию (в данном случае электродинамику), они бы поняли, что ответ на этот вопрос отрицателен: её уравнения симметричны, но эта симметрия спонтанно нарушена за счёт «разлитого» повсюду магнитного поля. Развивая 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 описанную. Но есть и важные отличия. Во-первых, ни о какой среде наподобие кристаллической решётки атомов железа говорить не приходится. В природе состояние с наименьшей энергией — 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, 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 идёт 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: 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 доселе неизвестным, 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 поле 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 счёт спонтанного нарушения симметрии предложили в контексте физики элементарных частиц теоретики из Брюсселя

⁴ Похожие механизмы стали известны раньше в физике конденсированных сред благодаря работам Г. и Ф. Лондонов, В. Л. Гинзбурга и Л. Д. Ландау, Н. Н. Боголюбова, П. У. Андерсона, теории Бардина — Купера — Шриффера и других.



Английский физик Питер В. Хиггс в начале 1960-х годов доказал, что в Стандартной модели элементарных частиц должен быть ещё один бозон — квант поля, которое создаёт массу у материи.

Франсуа Энглер и Роберт Браут в 1964 году и чуть позже — физик из Эдинбурга Питер Хиггс⁴.

Исследователи опирались на представление о спонтанном нарушении симметрии (но в теориях без векторных полей, то есть без частиц спина 1), которое ввели в 1960—1961 годах в своих работах Й. Намбу, он же совместно с Дж. Йона-Лазинио, В. Г. Вакс и А. И. Ларкин, Дж. Голдстоун (Йоичиро Намбу получил за эту работу 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 к 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 влечёт за собой появление массы у частицы спина 1 — кванта векторного поля!

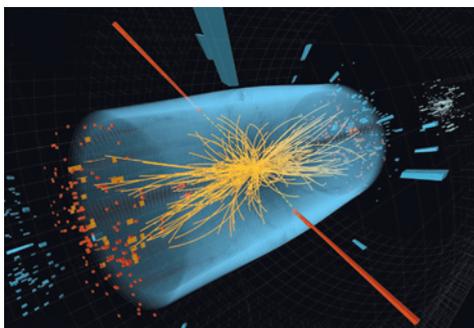
Довольно прямолинейное обобщение механизма Энглера — Браута — Хиггса, связанное с включением в теорию фермионов и их взаимодействия с нарушающим симметрию скалярным полем, приводит к появлению массы и у фермионов. Всё начинает становиться на свои места! Стандартная модель получает дальнейшее обобщение. В ней теперь есть не одно, а несколько 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 Салам получили в 1979 году Нобелевскую премию.

Вернёмся в 1964 год. Для анализа своей теории Энглер и Браут использовали довольно вычурный по сегодняшним меркам подход. Наверное, поэтому они не заметили, что наряду с массивной частицей спина 1 теория предсказывает существование ещё одной частицы — бозона со спином 0. А вот Хиггс заметил, и сейчас эту новую бесспиновую частицу часто называют бозоном Хиггса. Как уже отмечалось, такая терминология не вполне корректна: впервые предложили использовать скалярное поле для спонтанного нарушения симметрии и генерации масс частиц спина 1 всё же Энглер и Браут. Не вдаваясь больше в терминологию, подчеркнём, что новый бозон с нулевым спином служит 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 трёх бозонов W^+ , W^- , Z имел бы, как фотон, две поляризации. Итого, считая частицы с разными поляризациями неодинаковыми, 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

Частицы, ускоренные в Большом адронном коллайдере до огромных энергий, сталкиваются, порождая множество вторичных частиц — продуктов реакции. Среди них был обнаружен и бозон Хиггса, который физики надеялись отыскать без малого полвека.



— квантов полей W^\pm , Z . Спрашивается, откуда взялись три «лишних» типа квантов? Дело в том, что Стандартной модели необходимо иметь не одно, а четыре скалярных поля Энглера — Браута — Хиггса. Квант одного из них — это бозон Хиггса. А кванты трёх других в результате спонтанного нарушения симметрии как раз и превращаются в три «лишних» кванта, имеющих у массивных W^\pm - и Z -бозонов. Они 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 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 четырёх скалярных полей Энглера — Браута — Хиггса в Стандартной модели. Три других поедаются (научный термин!) W^\pm - и Z -бозонами, превращаясь в их третьи, недостающие спиновые состояния.

А ТАК ЛИ УЖ 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 симметрии в физике микромира и генерации масс элементарных частиц, а бозон Хиггса мог бы и не существовать. Например, в физике конденсированных сред (жидкостей, твёрдых тел) имеется множество примеров спонтанного нарушения симметрии и разнообразия механизмов этого нарушения. И в большинстве случаев ничего похожего на бозон Хиггса в них нет.

Ближайший твёрдотельный аналог спонтанного нарушения симметрии Стандартной модели в вакууме — спонтанное нарушение внутренней симметрии электродинамики в толще сверхпроводника. Оно приводит к тому, что в сверхпроводнике фотон в определённом смысле обладает массой (как W^\pm - и Z -бозоны в вакууме). Проявляется это в эффекте

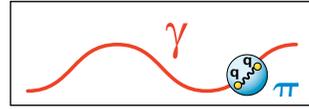
Мейсснера — выталкивании магнитного поля из сверхпроводника. Фотон «не хочет» проникать внутрь сверхпроводника, где он становится массивным: ему там «тяжело», энергетически невыгодно там находиться (вспомните: $E = mc^2$). Магнитное поле, которое можно несколько условно считать набором фотонов, обладает тем же свойством: оно в сверхпроводник не проникает. Это и есть эффект Мейсснера.

Эффективная теория сверхпроводимости Гинзбурга — Ландау чрезвычайно похожа на теорию Энглера — Браута — Хиггса (точнее, наоборот: теория Гинзбурга — Ландау на 14 лет старше). В ней 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 нём есть электроны и кристаллическая решётка, а сверхпроводимость обусловлена особыми свойствами основного состояния системы электронов, возникающими благодаря взаимодействию между ними (см. «Наука и жизнь» № 2, 2004 г., статья «Сверхпроводимость и сверхтекучесть».

— Прим. ред.)

Не может ли подобная картина иметь место и в микромире? Не окажется ли так, что никакого фундаментального скалярного поля, «разлитого» в вакууме, нет, а спонтанное нарушение симметрии вызвано совершенно иными причинами? Если раскладывать чисто теоретически и не обращать внимания на экспериментальные факты, то ответ на этот вопрос утвердительный. Удачным примером служит так называемая модель техницвета, предложенная в 1979 году уже упоминавшимся Стивеном Вайнбергом и — независимо — Леонардом Сасскиндом.

В ней нет ни фундаментальных скалярных полей, ни бозона Хиггса, а вместо них — много новых элементарных частиц, по своим свойствам напоминающих кварки. Взаимодействие между ними и приводит к спонтанному нарушению симметрии и генерации масс W^{\pm} - и Z -бозонов. С массами известных фермионов, например электрона, дело обстоит хуже, но и эту проблему можно решить за счёт усложнения теории.



Фотон большой длины волны и, значит, низкой энергии не способен разрешить структуру π-мезона — пары кварк-антикварк.

Внимательный читатель может задать вопрос: «А как же с аргументами предыдущей главы, 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, «истинно» элементарных частиц.

Вспомним в этой связи квантово-механическое соотношение неопределённостей Гайзенберга $\Delta x \times \Delta p \geq \hbar$, где Δx и Δp — неопределённости координаты и импульса соответственно. Одно из его проявлений состоит в том, что структура составных объектов с характерным внутренним размером Δx проявляется лишь в процессах с участием частиц с достаточно высокими импульсами $p \geq \hbar/\Delta x$, а значит, с достаточно большими 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 их вполне можно считать квантами некоторого поля. Если спин составной частицы равен нулю, то это поле скалярное.

Подобная ситуация реализуется, например, в физике π-мезонов, частиц со спином 0. До середины 1960-х годов не было известно, что они состоят из кварков и антикварков (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).

Тогда π-мезоны описывались элементарными скалярными полями. Теперь мы знаем, что эти частицы составные, но «старая» полевая теория π-мезонов остаётся в силе, поскольку рассматриваются процессы при низких энергиях.

Лишь при энергиях порядка 1 ГэВ и выше начинает проявляться их кварковая структура, и теория перестаёт работать. Энергетический масштаб 1 ГэВ здесь появился неслучайно: это масштаб сильных взаимодействий, связывающих кварки в π -мезоны, протоны, нейтроны и т.д., это масштаб масс сильновзаимодействующих частиц, например протона. Отметим, что сами π -мезоны стоят особняком: по причине, о которой мы не станем здесь говорить, они имеют гораздо меньшие массы: $m_{\pi^\pm} = 140$ МэВ, $m_{\pi^0} = 135$ МэВ.

Итак, скалярные поля, ответственные за спонтанное нарушение симметрии, в принципе могут быть составными. Именно такую ситуацию предполагает модель 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 уже не 1 ГэВ, а несколько ТэВ. В такой картине ожидается существование множества новых составных частиц — аналогов протона, нейтрона и т.д. — с массами порядка нескольких ТэВ. Сравнительно лёгкий бозон Хиггса в ней, наоборот, отсутствует. Ещё одна особенность модели в том, что W^\pm - и Z -бозоны в ней — частицы отчасти составные, поскольку, как мы сказали, некоторые их компоненты аналогичны π -мезонам. 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 её изначальной формулировке) была отвергнута задолго до обнаружения нового бозона: точные измерения свойств W^\pm - и Z -бозонов на LEP и SLC не согласуются с предсказаниями модели.

Эта красивая теория была разгромлена упрямыми экспериментальными фактами, а открытие бозона Хиггса поставило на ней окончательный крест. Тем не менее для меня, как и для ряда других теоретиков, идея о составных скалярных полях привлекательней теории Энглера — Браута — Хиггса с элементарными скалярными полями. Конечно, после открытия в ЦЕРНе нового бозона идея о составности оказалась в ещё более трудном положении, чем раньше: если эта частица составная, она должна достаточно успешно мимикрировать под элементарный бозон Хиггса. И всё же поживём — увидим, что покажут эксперименты на LHC, в первую очередь более точные измерения свойств нового бозона.

ОТКРЫТИЕ СДЕЛАНО. ЧТО ДАЛЬШЕ?

Вернёмся, 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 даёт массы всем элементарным частицам, взаимодействие каждой из этих частиц с бозоном Хиггса жёстко 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. Он требует, чтобы сумма масс продуктов распада была меньше массы распадающейся частицы (опять вспоминаем $E = mc^2$), а у нас, напомним, $m_t \approx 173$ 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 тяжёлых τ -лептонов $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ ($m_\tau = 1,8$ ГэВ), происходящий с вероятностью 6%. Распад $H \rightarrow \mu^+\mu^-$ ($m_\mu = 106$ МэВ) должен происходить с ещё меньшей, но всё же исчезающей вероятностью 0,02%. Помимо обсуждавшихся выше распадов $H \rightarrow \gamma\gamma$; $H \rightarrow 4\ell$ и $H \rightarrow 2\ell 2\nu$, отметим распад $H \rightarrow Z\gamma$, вероятность которого должна составлять 0,15%. Все эти вероятности можно будет измерить на LHC, 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 её справедливости.

То же можно сказать и о рождении бозона Хиггса в столкновениях протонов. Бозон Хиггса может рождаться в одиночку при взаимодействии двух глюонов, вместе с парой лёгких кварков высоких энергий, 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 LHC по отдельности. Тем самым удаётся извлекать информацию о взаимодействии бозона Хиггса с W^\pm -, Z -бозонами и t -кварком.

Наконец, важное свойство бозона Хиггса — его взаимодействие с самим со-

бой. Оно должно проявляться в процессе $H^* \rightarrow HH$, где H^* — виртуальная частица. Свойства этого взаимодействия тоже однозначно предсказывает Стандартная модель. Впрочем, его изучение — дело отдалённого будущего.

Итак, на ЛНС имеется обширная программа исследования взаимодействий нового бозона. В результате её выполнения станет более или менее ясно, описывает ли природу Стандартная модель или мы имеем дело с какой-то другой, более сложной (а возможно, и более простой) теорией. Дальнейшее продвижение связано с существенным повышением точности измерений; оно потребует строительства нового электрон-позитронного ускорителя — e^+e^- -коллайдера с рекордной для такого типа машин энергией. Очень может быть, что на этом пути нас поджидает масса сюрпризов.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ: В ПОИСКАХ «НОВОЙ ФИЗИКИ»

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

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

В физике имеется ещё один масштаб энергий. Он связан с гравитацией и равен массе Планка $M_{\text{пл}} = 10^{19}$ ГэВ. При низких энергиях гравитационные взаимодействия между частицами пренебрежимо малы, но они усиливаются с ростом энергии, и при энергиях порядка $M_{\text{пл}}$ гравитация становится сильной. Энергии выше $M_{\text{пл}}$ — это область квантовой гравитации, что бы она собой ни представляла. Для нас важно, что гравитация — пожалуй, самое фундаментальное

взаимодействие и гравитационный масштаб $M_{\text{пл}}$ — самый фундаментальный масштаб энергий. Почему же тогда масштаб Стандартной модели $M_{\text{см}} = 100$ ГэВ так далёк от $M_{\text{пл}} = 10^{19}$ ГэВ?

У обозначенной проблемы есть ещё один, более тонкий аспект. Он связан со свойствами физического вакуума. В квантовой теории вакуум — основное состояние природы — устроен весьма нетривиально. В нём 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 обусловлена 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 заложенные в теорию, получают поправки, называемые радиационными, за счет взаимодействия с виртуальными частицами. В квантовой электродинамике они малы, а вот в секторе Энглера — Брауты — 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 $M_{\text{см}}$ к гравитационному масштабу $M_{\text{пл}}$. Если оставаться в рамках Стандартной модели, то единственный выход — подобрать начальные параметры теории так, чтобы вместе с радиационными поправками они приводили к правильному значению $M_{\text{см}}$. Однако выясняется, что точность подгонки должна составлять величину, близкую к $M_{\text{см}}^2/M_{\text{пл}}^2 = 10^{-34}$! В этом и состоит второй аспект проблемы энергетического масштаба Стандартной модели: представляется неправдоподобным, что такая подгонка имеет место в природе.

Многие (хотя, повторим, не все) теоретики считают, что эта проблема однозначно свидетельствует о необходимости выхода за рамки Стандартной модели.

Действительно, если Стандартная модель перестаёт работать или существенно расширяется на энергетическом масштабе «новой физики — НФ» $M_{\text{НФ}}$, то требуемая точность подгонки параметров составит, грубо говоря, $M_{\text{см}}^2/M_{\text{НФ}}^2$, а на самом деле порядка на два меньше. Если считать, что тонкой подстройки параметров в природе нет, то 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 котором уже говорилось. Другая, тоже популярная (пока?) возможность — суперсимметрия, о которой скажем только, что она предсказывает целый зоопарк новых частиц с массами в области сотен

ТэВ — нескольких ТэВ. Обсуждаются и весьма экзотические варианты вроде дополнительных измерений пространства (скажем, так называемая M -теория — см. «Наука и жизнь» №№ 2, 3, 1997 г. статья «Суперструны: на пути к теории всего». — Прим. ред.).

Несмотря на все усилия, до сих пор никаких экспериментальных указаний на «новую физику» не получено. Это, вообще-то, уже начинает внушать тревогу: а правильно ли мы всё понимаем? Вполне возможно, впрочем, что мы ещё 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 возлагают опять-таки на Большой адронный коллайдер, который через полтора года начнёт работать на полную энергию 13—14 ТэВ и быстро набирать данные. Следите за новостями!

СЛОВАРИК К СТАТЬЕ

Коллайдер — ускоритель со встречными пучками частиц, в котором частицы сталкиваются «лоб в лоб», например, электроны и позитроны в e^+e^- -коллайдерах. 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. Основными коллайдерами для физики элементарных частиц служат протон-антипротонные, протон-протонные и электрон-позитронные.

Большой адронный коллайдер (LHC) — протон-протонный, он ускоряет два пучка протонов один навстречу другому (может также работать и как тяжелоионный коллайдер). Проектная энергия протонов в каждом из пучков составляет 7 ТэВ, так что полная энергия столкнове-

ния — 14 ТэВ. В 2011 году коллайдер работал на половине этой энергии, а в 2012 году — на полной энергии 8 ТэВ. Большой адронный коллайдер представляет собой кольцо длиной 27 км, в котором протоны ускоряют электрические поля, а удерживают поля, созданные сверхпроводящими магнитами. Столкновения протонов происходят в четырёх местах, где расположены детекторы, регистрирующие частицы, рождающиеся в столкновениях. ATLAS и CMS предназначены для исследований в области физики элементарных частиц высокой энергии; LHCb — для изучения частиц, в составе которых имеются b -кварки, а ALICE — для исследований горячей и плотной кварк-глюонной материи.

SppS — 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 LHC. 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.

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 несёт 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 нём, достигает «всего» 2—4 ТэВ, в зависимости от изучаемого процесса. Такой особенности у электрон-позитронных коллайдеров нет: электрон — элементарная, бесструктурная частица.

Преимущество протон-протонных (и протон-антипротонных) коллайдеров в том, что даже с учётом 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 интересных 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. Всё это создаёт «шум», выделить из которого полезный сигнал сложнее, чем на электрон-позитронных коллайдерах. Соответственно, ниже и точность измерений. Из-за всего этого протон-протонные (и протон-антипротонные) коллайдеры называют машинами открытий, а электрон-позитронные — машинами точных измерений.

Кварки — один из типов элементарных частиц. В

свободном состоянии они не наблюдаются, а всегда связаны друг с другом и образуют составные частицы — адроны. Единственное исключение — t -кварк, он распадается, не успев объединиться с другими кварками или антикварками в адрон. К адронам относятся протон, нейтрон, p -мезоны, K -мезоны и др.

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

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

Частицы, перечисленные в Стандартной модели, кроме протона, электрона, нейтрино и их античастиц, нестабильны: они распадаются на другие частицы. Впрочем, два типа нейтрино из трёх 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. Легчайшее нейтрино (спин $1/2$) не распадается из-за сохранения углового момента. Распад протона запрещён законом сохранения ещё одного «заряда», который называют барионным числом (барионное число протона по определению равно 1, а более лёгких частиц — нулю).

С барионным числом связана ещё одна внутренняя симметрия. Точная она или

приближённая, стабильны ли протон или имеет конечное, хотя и очень большое время жизни — предмет отдельного разговора.

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 квантово-механическому соотношению $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$ между неопределённостью энергии ΔE и длительностью процесса Δt . Поэтому виртуальная частица почти мгновенно распадается или аннигилирует с другой (её время жизни Δt очень мало), а реальная живёт заметно дольше или вообще стабильна.

Лэмбовский сдвиг уровней — небольшое отклонение тонкой структуры уровней атома водорода и водородоподобных атомов под действием испускания и поглощения ими виртуальных фотонов или виртуального рождения и аннигиляции электрон-позитронных пар. Эффект обнаружили в 1947 году американские физики У. Лэмб и Р. Резерфорд.

Стандартное отклонение (среднеквадратичное отклонение) σ_x — характеристика случайных отклонений измеренной величины от среднего значения. Вероятность того, что измеренное значение величины X случайным образом окажется отличающимся на $5\sigma_x$ от истинного, составляет всего 0,00006%. Именно поэтому в физике элементарных частиц отклонение сигнала от фона на 5σ считают достаточным для признания сигнала истинным.