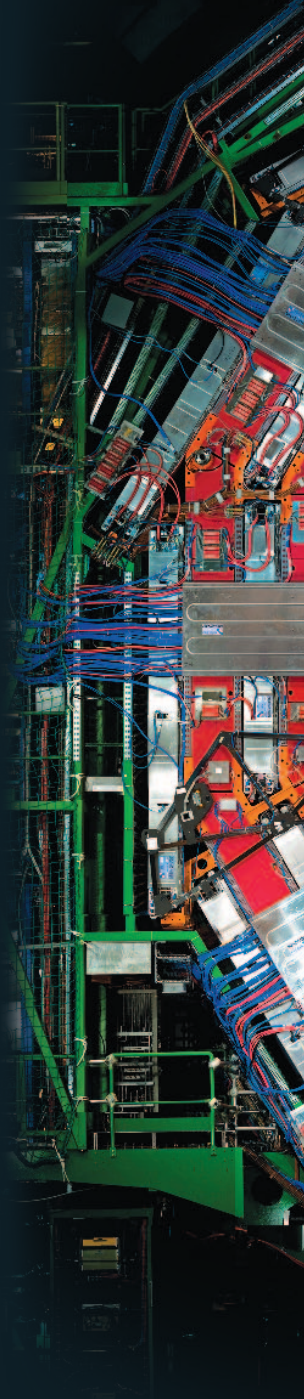
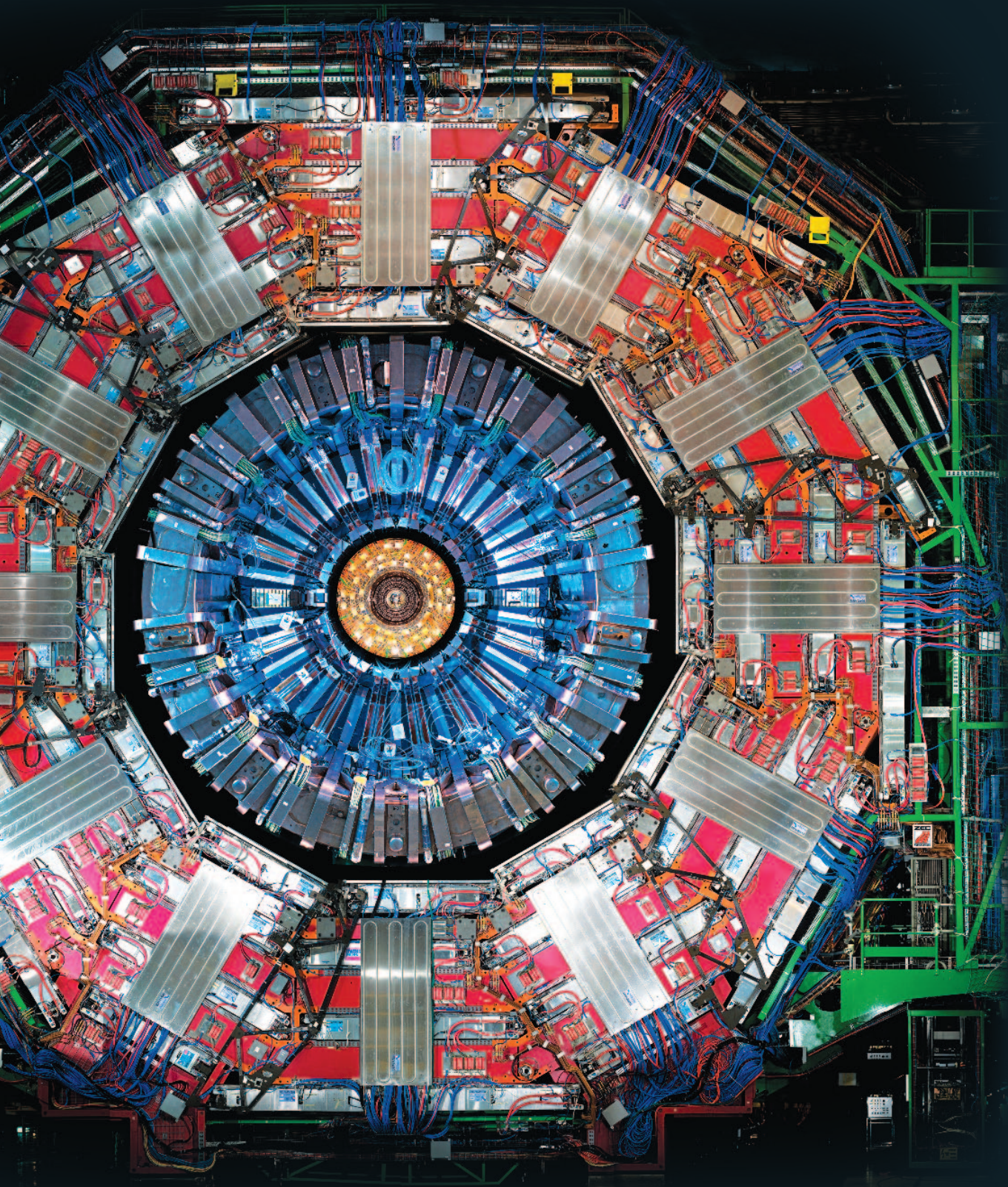


Джозеф Ликкен и Мария Спиропулу

# Суперсимметрия и кризис в физике

*Несколько десятилетий физики работали над развитием красивой теории, которая обещала привести к более глубокому пониманию квантового мира. Сегодня они стоят на перепутье: либо ее правота будет доказана уже в следующем году, либо предстоит эпохальная смена парадигмы*



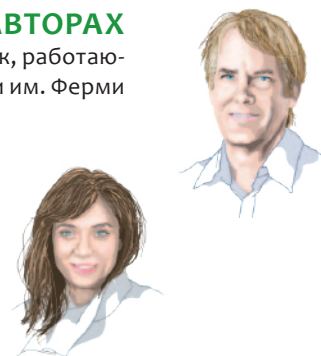


Заключительная стадия поисков свидетельств суперсимметрии на детекторе CMS Большого адронного коллайдера начнется, когда БАК снова вступит в строй в начале 2015 г.

## ОБ АВТОРАХ

**Джозеф Ликкен** (Joseph Lykken) — физик-теоретик, работающий в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (Фермилаб) в Батавии, штат Иллинойс.

**Мария Спиropулу** (Maria Spiropulu) — физик, занимающийся экспериментальной физикой элементарных частиц в Калифорнийском технологическом институте. Проработав много лет на Теватроне Фермилаба, сейчас она занята поиском суперсимметрии в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере CERN.



Э то было одной из ночей 2012 г., уже переходящей в утро. Мы допивали по третьей чашечке кофе, когда видеосвязь соединила наш кабинет в Калифорнийском технологическом институте с расположенной вблизи Женевы лабораторией CERN. На экране монитора мы увидели коллег из группы «Бритва» — одной из множества групп физиков, занятых анализом данных с детектора CMS на Большом адронном коллайдере. «Бритва» была организована для поиска экзотических соударений, которые должны были предоставить первые подтверждения суперсимметрии — описывающей материю теории, возраст которой сегодня насчитывает уже 45 лет. Эта теория должна была прийти на смену стандартному толкованию физики элементарных частиц, позволив решить глубинные проблемы в физике и объяснить природу загадочной темной материи Вселенной. Несколько десятилетий поисков не дали суперсимметрии ни единого экспериментального подтверждения.

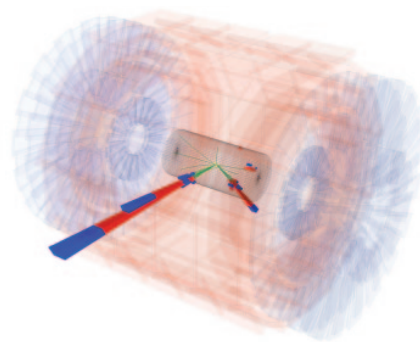
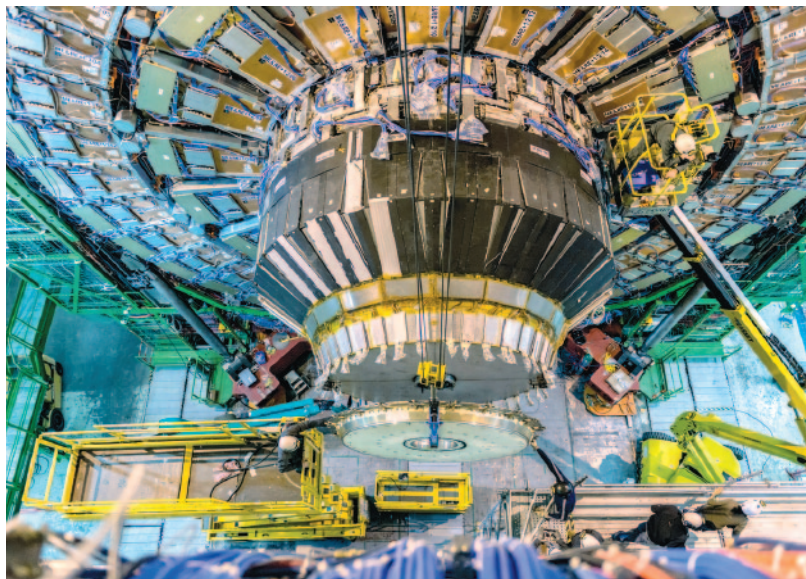
В CERN руководитель группы «Бритва» Маурицио Пьерини (Maurizio Pierini) бросил короткий взгляд на график с новыми данными, и с расстояния в девять временных поясов мы увидели, как удивленно поднялись его брови: вот она, явная аномалия. «Только взгляните на это событие», — сказал Пьерини, словно констатируя рядовой факт. Под словом «событие» он имел в виду одно из триллионов столкновений пары протонов, происходящих внутри детекторов БАК. Не прошло и нескольких минут, как мы получили детальные данные регистрации этого столкновения на свой лэптоп.

Суперсимметрия — это изумительно красивое решение фундаментальных проблем, которые мучили физиков на протяжении более чем четырех десятилетий. Она давала ответы на целый ряд важных вопросов. Почему частицы имеют массы, которые они имеют? Почему силы имеют силы, которые они имеют? Короче говоря: почему Вселенная выглядит так, как она выглядит? Кроме того, суперсимметрия предсказывает, что Вселенная заполнена скрывающимися до настоящего времени частицами-«суперпартнерами», которые позволят решить загадку темной материи. Не будет преувеличением сказать, что большинство физиков на нашей планете, занимающихся физикой элементарных частиц, полагают, что суперсимметрия, должно быть, верна, — эта теория очень убедительна. Физики долго надеялись, что БАК наконец-то позволит обнаружить этих суперпартнеров, дав тем самым веские доказательства, что суперсимметрия — это действительно адекватное описание Вселенной.

Когда мы получили данные этого интересного соударения, мы сразу же увидели, что, похоже, держим в руках неопровержимое свидетельство суперсимметрии. Мы увидели, как два сгустка частиц очень высокой энергии движутся в одном направлении и отскакивают от чего-то невидимого — возможно, от суперпартнера? Однако уже скоро мы заметили большой красный пик в данных. Может быть, это ложный сигнал из-за сбоя в детекторе? Так оно и оказалось — еще одно разочарование в нескончаемых, похоже, поисках суперсимметрии.

## ! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Суперсимметрия постулирует, что каждая известная частица имеет скрытого суперпартнера. Физики любят симметрию, поскольку она позволяет решить несколько проблем, которые неожиданно появляются, когда они пытаются расширить наше понимание квантовой механики. Кроме того, теоретически она позволит разгадать загадку недостающей темной материи во Вселенной.
- Физики надеялись обнаружить свидетельство суперсимметрии в экспериментах на Большом адронном коллайдере (БАК). До настоящего времени они ничего не обнаружили. Если в следующей серии экспериментов на БАК не появится никаких доказательств, у суперсимметрии возникнут серьезные проблемы.
- Неудача в попытках найти суперпартнеров станет свидетельством назревшего кризиса в физике и заставит ученых поставить под вопрос постулаты, на основе которых они работали несколько десятилетий.



**Усовершенствование эксперимента CMS (слева)** поможет в поисках суперсимметрии. Положительный сигнал о суперсимметрии, по всей видимости, будет похож на это событие 2012 г. (вверху): две высокоэнергетические струи частиц в нижней половине детектора дают основание предположить, что недостающая материя — возможно, «темный» суперпартнер — ушла через верхнюю его половину.

Фактически результаты первого цикла экспериментов на БАК исключили почти все самые изученные версии суперсимметрии. Отрицательные результаты породили если не полномасштабный кризис в физике элементарных частиц, то по крайней мере обширную панику. Следующая серия экспериментов на БАК начнется в начале 2015 г. с максимальными энергиями, которые возможны на этом ускорителе, что позволит ученым, работающим на детекторах *ATLAS* и *CMS*, обнаружить (или же исключить) даже более массивных суперпартнеров. Если в конце этой серии ничего нового не обнаружится, фундаментальная физика столкнется с дилеммой: или выбросить в мусорную корзину работу целого поколения физиков из-за отсутствия свидетельств того, что природа играет по нашим правилам, или же активно продолжить работу в надежде, что когда-нибудь где-нибудь еще более мощный ускоритель позволит получить доказательства, что все это время мы были правы.

Конечно же история науки насчитывает множество примеров долгих поисков, закончившихся триумфом. Свидетельство тому — открытие на Большом адронном коллайдере долгое время остававшегося неуловимым бозона Хиггса. Но на сегодня большинство физиков-теоретиков, занимающихся физикой элементарных частиц, нервно грызут ногти в ожидании, когда новые данные с БАК вот-вот проверят на прочность фундамент величественного здания теоретической физики, возведенного в течение минувших 50 лет.

### Необходимость суперсимметрии

Суперсимметрия — это часть более широкой атаки с целью понять глубинные загадки квантовой странности. В нашем распоряжении есть фантастически успешная теория субатомной физики, позволяющая делать предсказания новых эффектов, получившая прозаическое название «стандартная модель», которая для описания частиц и сил объединяет квантовую механику с эйнштейновской теорией относительности. Материя

состоит из одного сорта частиц, называемых фермионами (в честь Энрико Ферми) и удерживаемых друг с другом силами, обязанными другому типу частиц, называемых бозонами (в честь Шатьендраната Бозе).

Стандартная модель позволяет прекрасно описать то, что происходит в субатомном мире. Но неприятности начинают происходить, когда мы задаемся вопросом, почему стандартная модель именно такова, как она есть. Например, она утверждает, что есть три различных типа лептонов (одного из видов фермионов): электрон, мюон и тау-лептон. Почему именно три? Почему не два, не четыре или, например, не 15? Стандартная модель ничего по этому поводу не говорит. Чтобы найти ответ, нам потребуется исследовать более глубокий уровень природы. Аналогично мы могли бы спросить: почему электрон имеет массу, которую он имеет? Почему он легче, например, бозона Хиггса? Стандартная модель снова молчит по этому поводу.

Физики-теоретики потратили уйму времени, размышляя над этими вопросами. Они построили модели, которые объясняют, почему стандартная модель выглядит так и никак иначе. Теория струн, например, — это одна из попыток проникнуть на глубокий уровень реальности. Есть большое количество и других примеров.

Тем не менее каждая из этих дополняющих теорий не лишена проблем. Любая теория (вроде теории струн), которая ведет к новой физике, обязательно подразумевает существование новых гипотетических частиц. Эти частицы, по всей видимости, имеют чрезвычайно большую массу, которая объясняет, почему мы еще не обнаружили их в ускорителях, таких как БАК, поскольку частицы с большой массой очень трудно получить. Но даже частицы большой массы аналогично бозону Хиггса, по-видимому, тоже влияют на обычные частицы. Почему? Ответ лежит в самой природе квантовой теории.

В квантовой механике частицы взаимодействуют друг с другом посредством обмена так называемыми виртуальными частицами, которые рождаются и почти сразу

же умирают. Например, электрическая сила отталкивания между двумя электронами описывается в первом приближении как обмен ими виртуальным фотоном. Ричард Фейнман вывел элегантные правила для описания квантовых эффектов в терминах стабильных частиц, взаимодействующих с помощью дополнительных виртуальных частиц.

Однако в квантовой теории все, что строго не запрещено, происходит и на самом деле, по крайней мере время от времени. Посредством обмена виртуальными частицами электроны будут взаимодействовать не только друг с другом, они должны взаимодействовать и со всеми другими частицами — включая наши новые гипотетические частицы, добавленные для расширения стандартной модели. И эти взаимодействия будут создавать новые проблемы, если только в теорию не включено еще что-нибудь вроде суперсимметрии.

### Естественная суперсимметрия расчищает для физиков путь к развитию новых идей для осмысления стандартной модели

Возьмем бозон Хиггса, который в стандартной модели придает элементарным частицам массу. Если бы у вас был бозон Хиггса и вдобавок к нему некие сверхтяжелые частицы, они начали бы общаться друг с другом посредством виртуальных квантовых взаимодействий. Сам бозон Хиггса стал бы сверхтяжелым. И в то же мгновение все во Вселенной превратилось бы в сверхтяжелые частицы. И вы, и я сжались бы до состояния черных дыр. Самое адекватное объяснение, почему этого не происходит на самом деле, — суперсимметрия.

#### Перспективы суперсимметрии

Основная идея суперсимметрии, которая среди физиков получила прозвище *SUSY* (произносится как имя «Сьюзи»), была разработана физиками, интересовавшимися связью между симметрией и физикой элементарных частиц, в 1970-х гг. Суперсимметрия — это не одна какая-то теория, а скорее основа для построения различных теорий. Любую отдельную модель Вселенной можно отнести к категории «суперсимметрия», если она обладает определенными свойствами.

Множество типичных суперсимметрий встроены в физические законы, управляющие частицами и силами. Эти законы не зависят от того, где вы находитесь, проводя измерения, в каком направлении вы смотрите и движетесь ли вы или же неподвижны относительно объектов, которые наблюдаете. Из этих пространственно-временных видов симметрий математически следуют законы сохранения энергии, импульса и момента импульса. Исходя из одних лишь симметрий мы можем вывести связь между энергией, импульсом и массой,

иллюстрируемую хорошо известным всем соотношением  $E = mc^2$ . Все это стало понятным еще в 1905 г., когда Альберт Эйнштейн создал специальную теорию относительности.

Квантовая физика, безусловно, уважает все эти симметрии. Ученые даже использовали симметрии для предсказания новых явлений. Например, Поль Дирак показал в 1930 г., что когда вы объединяете квантовую механику с теорией относительности, из пространственно-временных симметрий следует, что каждая частица должна иметь соответствующую античастицу — частицу с противоположным зарядом. Эта идея казалась в то время сумасшедшей, поскольку никто никогда не видел античастиц. Но Дирак, как оказалось, был прав. Его теоретические построения, основанные на соображениях симметрии, привели к смелым, но правильным предсказаниям, что элементарных частиц примерно в два раза больше, чем все ожидали.

Суперсимметрия основана на предположении, сходном с дираковским. Оно постулирует, что существует квантовое продолжение пространства-времени, называемое суперпространством, и что частицы симметричны в этом суперпространстве.

В суперпространстве нет привычных пространственных координат и таких понятий, как «лево — право» и «верх — низ», а есть лишь дополнительные фермионные координаты. Движение в фермионном пространстве весьма ограничено. В обычном пространстве вы можете двигаться по координатной оси сколь угодно далеко в любом направлении, и нет никаких ограничений по длине и количеству ваших шагов. В противоположность этому в фермионных координатах ваши шаги квантуются, и когда вы сделали один шаг, фермионное пространство оказывается «заполненным». Если вы желаете сделать еще один шаг, вы должны либо перейти в другое фермионное пространство, либо вернуться на один шаг назад.

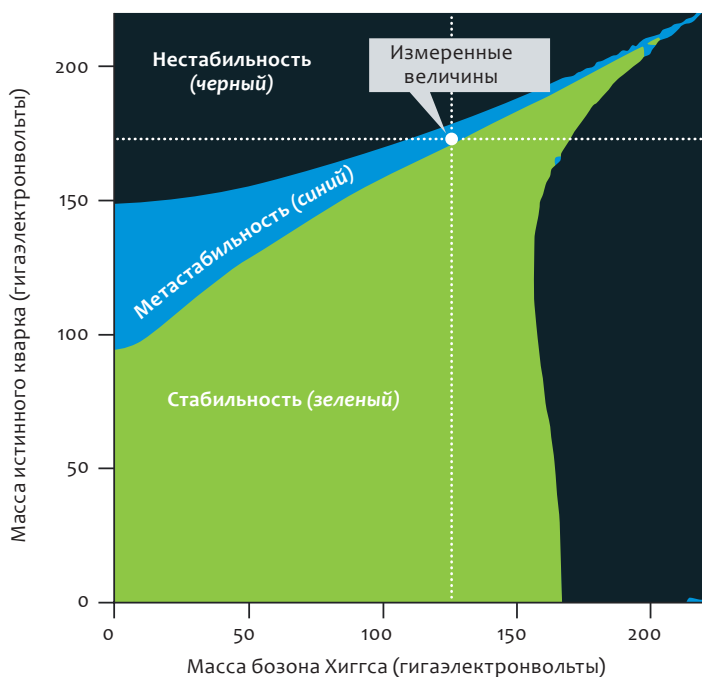
Если вы бозон, то один шаг в фермионном пространстве превратит вас в фермион; если вы фермион, то тот же шаг в фермионном пространстве превратит вас в бозон. Более того, если вы сделаете шаг в фермионном пространстве, а затем шаг назад, вы обнаружите, что вы также переместились и в обычных пространстве или времени на некоторое минимальное расстояние. Таким образом, движение в фермионном пространстве некоторым сложным образом тесно привязано к обычному движению.

Почему все это существенно? Потому, что в мире суперсимметрии симметрии в фермионных измерениях вносят ограничения характера взаимодействия частиц. В частности, так называемые естественные суперсимметрии очень сильно подавляют эффекты, связанные с виртуальными частицами. Естественные симметрии запрещают бозону Хиггса такие взаимодействия с высокоэнергетическими частицами, при которых мы превратимся в черные дыры. (Теории, которые, будучи суперсимметричными, при этом не естественные, требуют от нас введения дополнительных механизмов

Космические последствия

НА КРАЮ ГИБЕЛИ

Бозон Хиггса рассказывает много интересного о поле Хиггса — энергетическом поле, которое придает элементарным частицам массу. Насколько нам известно, это поле постоянно, поскольку любое внезапное его изменение уничтожит Вселенную. Однако результаты недавних измерений массы бозона Хиггса, будучи сопоставленными с массой *t*-кварка (истинного кварка), показывают, что поле Хиггса не совсем стабильно. Оказывается, оно пребывает в так называемом метастабильном состоянии. Квантовые эффекты теоретически могут перебросить его в состояние с меньшей энергией, уничтожив в этом процессе всю Вселенную. (Не волнуйтесь: это, скорее всего, не случится на протяжении еще многих миллиардов лет.) Суперсимметрия могла бы стабилизировать поле Хиггса.



подавления виртуальных частиц.) Естественная суперсимметрия расчищает для физиков путь к развитию новых идей для осмысления стандартной модели.

**В поисках суперсимметрии**

Во всех теориях суперсимметрии предполагается, что каждая частица-бозон имеет в качестве партнера частицу-фермион, так называемого суперпартнера, и наоборот. Поскольку никакие из известных частиц-бозонов и фермионов, по всей видимости, не служат суперпартнерами друг для друга, теория суперсимметрии может быть верна лишь в том случае, если во Вселенной присутствует большое число частиц-суперпартнеров, которые пока не были обнаружены.

В этом-то вся проблема. В простейших, самых мощных, версиях теории суперсимметрии — естественной суперсимметрии — суперпартнеры не должны быть намного тяжелее бозона Хиггса. Это означает, что мы обязаны были найти их в экспериментах на БАК. И впрямь, если бы вы спросили физиков десять лет назад, большинство из них сказали бы, что к нынешнему

дню мы уже наверняка обнаружим доказательства существования суперпартнеров.

Однако пока что мы их не нашли. Мария Спиропулу, одна из авторов этой статьи, вспоминает тот день в 2009 г., когда ровно в полночь я заступил на дежурство в качестве руководителя смены на детекторе *CMS*. В зале управления находилось много физиков, каждый из которых отслеживал одну из подсистем огромного комплекса детектора общим весом в 14 тыс. т. В два часа ночи мне позволили из Центра управления *CERN*, расположенного на противоположной стороне 27-километрового кольца БАК: сегодняшняя ночь будет решающей. Они собирались провести соударения протонов с самой высокой энергией из когда-либо сталкивавшихся учеными.

Я дал указания тщательно подготовить все компоненты детектора *CMS*, чтобы сохранить самые недолговечные его части для последнего эксперимента. В 4:11 утра детектор ожил. Стена, увешенная мониторами, словно взбесилась: сверхскоростная электроника мерцала картинками соударений, происходящих 20 млн раз в секунду на глубине 100 м под нами. После десяти лет погони за суперсимметрией на Теватроне Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми в Батавии, штат Иллинойс, мое сердце скакало в груди в предчувствии, когда я отмечал определенные картины. Успокойся, говорил я себе, это всего лишь начало: анализировать соударения, рассматривая визуальную картинку, довольно соблазнительно, но таким путем открытия не сделать.

Конечно же, построив ускоритель стоимостью \$10 млрд и включив его, вряд ли стоит ожидать открытий в первую же ночь — или даже в течение первого года. Однако наши ожидания были высоки уже с самого начала. Мы на детекторе *CMS* (равно как и те, кто работал на *ATLAS*) тщательно разработали план: открыть суперсимметрию уже на основе первых данных с БАК. Мы надеялись обнаружить частицы темной материи в сигналах суперсимметрии не «в лоб», а фиксируя «недостающую энергию»: громко кричащий о себе дисбаланс, который проявляется, когда видимые частицы отражаются от чего-то невидимого. Мы зашли в этом так далеко, что даже подготовили черновик статьи об открытии с заголовком и датой.

Статья эта так и осталась недописанной. На сегодня эксперименты оставили лишь несколько неисследованных закоулков, в которых, возможно, и прячутся суперпартнеры. Вряд ли они слишком легкие, иначе бы мы их уже обнаружили, но они не могут быть и слишком тяжелыми, поскольку тогда не будут удовлетворять требованиям естественной суперсимметрии — типу суперсимметрии, которая эффективна в подавлении виртуальных

SOURCE: "HIGGS MASS AND VACUUM STABILITY IN THE STANDARD MODEL AT NNLO," BY GIUSEPPE DEGRASSI ET AL., IN JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, VOL. 2012, NO. 8, ARTICLE NO. 98, AUGUST 2012

частиц. Если они не обнаружатся в течение следующего цикла экспериментов на БАК — и это не будет сделано достаточно быстро, — то кризис в физике поднимется в полный рост.

### Жизнь после суперсимметрии

Однако теоретики пока не готовы отказаться от более общей идеи о суперсимметрии — даже если она не сможет выполнить все те задачи, которые, как мы надеялись, позволяет решить естественная суперсимметрия. Вспомним, что суперсимметрия — всего лишь один из каркасов для построения моделей мира, а не сама модель как таковая. Поэтому данные будущих экспериментов, возможно, реабилитируют идею суперсимметрии, даже если все нынешние модели будут забракованы.

Во время своего доклада в Институте теоретической физики им. Кавли Калифорнийского университета в Санта-Барбаре Нима Аркани-Хамед (Nima Arkani-

Открытие бозона Хиггса  
показывает, что его  
энергетическое поле  
присутствует в каждой точке  
Вселенной и придает массу  
элементарным частицам.  
Это означает, что вакуум  
«пустого» пространства —  
очень бойкое место, где  
и энергия бозона Хиггса,  
и виртуальные частицы  
формируют сложную динамику

Named), физик из Института перспективных исследований в Принстоне, штат Нью-Джерси, рассказывал взад и вперед у доски, рассказывая битком заполненной аудитории о будущем суперсимметрии. Что будет, если суперсимметрию на БАК обнаружить так и не удастся, задался он вопросом, на который сам же и дал ответ: тогда мы разработаем новые модели суперсимметрии, которые поднимут суперпартнеров чуть выше уровня достижимой сегодня энергии. Но не будет ли это означать, что мы изменим нашу историю? В этом нет ничего страшного, теоретики не обязаны быть последовательными — последовательными должны быть их теории.

Эта несокрушимая верность суперсимметрии распространена довольно широко. Однако теоретики, работающие в области физики элементарных частиц, все же признают, что идея естественной суперсимметрии уже сильно скомпрометирована и быстро окажется

в мусорной корзине истории, если суперпартнеров не удастся обнаружить в скором времени. Это тупиковая ситуация напоминает те, что в прошлом приводили к смене парадигмы в науке. Например, более 100 лет назад неудача попыток обнаружить «светоносный эфир» привела к открытию специальной теории относительности.

Если суперсимметрия не служит верным описанием мира, что в таком случае могло бы занять ее место? Сегодня на этот вопрос существует три различных гипотетических ответа. Все они предполагают глубокий пересмотр взглядов на основы физики и космологии.

**Мультивселенная.** Величины фундаментальных сил и относительная величина масс частиц описываются числами, происхождение которых остается загадкой. Нам не хочется думать, что набор этих чисел случаен, поскольку если бы они лишь чуть-чуть отличались от реальных, Вселенная выглядела бы абсолютно иначе. Например, возникли бы значительные трудности с образованием атомов, и жизнь не смогла бы зародиться. На языке теоретической физики Вселенная, судя по всему, — это «тонко настроенный инструмент». Суперсимметрия пытается дать ответ на вопрос, почему эти параметры принимают такие значения, какие они принимают. Она приоткрывает дверь на более глубокий уровень физики. Но что делать, если этой двери не существует?

В таком случае нам остается рассматривать возможность, что эта «точная настройка» — всего лишь счастливая случайность, идея, которая становится более привлекательной, если постулировать существование мультивселенной. В сценарии мультивселенной в результате Большого взрыва образовалась не только Вселенная, которую мы наблюдаем, но и очень большое количество вариаций на тему нашей Вселенной, которые мы не видим. В этом случае такой вопрос, как: «Почему электрон имеет массу, которую он имеет?», получает ответ в форме: «Это просто слепая игра случая, в других частях мультивселенной существуют другие электроны с другими массами». Эти якобы точно настроенные сущности, которые кажутся нам загадочными, — просто случайное стечение обстоятельств в космической истории. Только во вселенных с параметрами, точно настроенными так, чтобы в них могла развиваться жизнь, появятся физики, озадаченные вопросом, почему они не нашли естественной суперсимметрии с помощью БАК.

Однако для многих физиков мультивселенная таит в себе неудобную аналогию — допущение, что аномалии в физике элементарных частиц вызваны армией невидимых ангелов. Нобелевский лауреат Дэвид Гросс (David Gross) сказал как-то, что обратиться к непознаваемым начальным условиям — это все равно что вообще отказаться от науки.

**Дополнительные размерности.** Физики Лиза Рэндалл (Lisa Randall) из Гарвардского университета и Раман Сундрум (Raman Sundrum) из Мэрилендского университета показали, что дополнительные пространственные измерения с так называемой «деформированной

геометрией» позволяют объяснить небольшую величину сил гравитации по сравнению с другими известными силами. Если эти дополнительные размерности действительно настолько малы, мы могли их просто не увидеть, но их размер и форма, вероятно, оказали бы очень сильное воздействие на физику элементарных частиц высоких энергий. Вместо того чтобы гоняться за суперпартнерами на БАК, с помощью таких моделей мы, быть может, обнаружим мир на основе модели Калуцы — Клейна, экзотические тяжелые частицы, чья масса — это энергия их движения в дополнительных пространственных измерениях.

**Размерная трансмутация.** Вместо того чтобы призывать на помощь суперсимметрию для подавления эффектов, связанных с виртуальными частицами, предложена новая идея — воспользоваться этими эффектами для объяснения, откуда берется масса. Рассмотрим протон. Протон — это неэлементарная частица. Он представляет собой композицию из трех кварков, которые имеют очень маленькую массу, и глюонов, вообще не имеющих массы. Протон гораздо тяжелее, чем суммарная масса кварков и глюонов внутри него. Откуда же тогда взялась дополнительная масса? А взялась она из энергетических полей, образованных силами «сильного» взаимодействия, которые удерживают протон как единое целое. Наше понимание этих полей позволяет нам в точности предсказать массу протона, основываясь на одних лишь обычных числах, таких как  $\pi$  (пи).

Странная ситуация складывается в физике элементарных частиц. Обычно мы можем вычислить массы частиц, лишь основываясь на массах других. Например, стандартная модель не дает нам способа предсказать массу бозона Хиггса — мы должны ее измерить опытным путем. Все это выглядит как явная ошибка, если учитывать, каким хитроумным способом мы можем предсказать массу протона. Основываясь на оригинальной работе Уильяма Бардина (William A. Bardeen), физика из Фермилаба, несколько теоретиков-радикалов недавно предположили, что шкала масс Хиггса формируется посредством аналогичного процесса, получившего название размерной трансмутации.

Если принять этот подход — оставить полезные эффекты виртуальных частиц, избегая при этом катастрофических (роль, которую в противном случае играет суперсимметрия), — мы должны будем отказаться от популярных рассуждений о том, каким образом законы физики можно объединить при сверхвысоких энергиях. К тому же долгожданную связь между квантовой механикой и общей теорией относительности он делает еще более непостижимой. Однако этот подход имеет свои преимущества. Такие модели позволяют генерировать массу у частиц темной материи. Они также предсказывают, что темная материя взаимодействует с обычной посредством силы, передаточным звеном которой служит бозон Хиггса. Это захватывающее предсказание будет проверяться в течение нескольких следующих лет в экспериментах как на БАК, так и в подземных детекторах темной материи.

Возможно, бозон Хиггса таит в себе и другие ключи. Открытие бозона Хиггса показывает, что его энергетическое поле присутствует в каждой точке Вселенной и придает массу элементарным частицам. Это означает, что вакуум «пустого» пространства — очень бойкое место, где и энергия бозона Хиггса, и виртуальные частицы формируют сложную динамику. Но тогда кто-то, возможно, спросит, действительно ли вакуум стабилен, или какое-то несчастливое квантовое событие, возможно, запустит однажды катастрофический переход от нашей Вселенной к чистому состоянию. Суперсимметрия действует как стабилизатор вакуума и предотвращает такие неприятности. Но без суперсимметрии стабильность вакуума очень сильно зависит от массы бозона Хиггса: более тяжелый бозон Хиггса предполагает стабильную Вселенную, тогда как более легкий в конечном итоге предполагает ее гибель. Примечательно, что измеренная масса бозона Хиггса приходится ровно на грань, что предполагает долгоживущий, но в итоге все же нестабильный вакуум. Природа пытается нам что-то сказать, но мы не можем ее понять.

## Будущее

Если суперпартнеры будут открыты в следующем цикле работы БАК, нынешнее беспокойство о судьбе физики элементарных частиц сменится огромным энтузиазмом по поводу окончательного прорыва за порог, туда, где лежит новый таинственный мир. Начнется потрясающее интеллектуальное приключение.

Однако если обнаружить суперпартнеров не удастся, мы столкнемся с крушением парадигмы, составляющей базис нашего понимания квантовой физики. Такая перспектива уже сейчас вдохновляет на переосмысливание базисных явлений, лежащих в основе структуры Вселенной. Лучшее понимание свойств бозона Хиггса станет фундаментом для построения новой парадигмы. Экспериментальные свидетельства темной материи, этого обособленного, но неизменного порождения физики элементарных частиц, возможно, в конце концов, станут путеводной звездой, указующей путь вперед. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Supersymmetry: Unveiling the Ultimate Laws of Nature. Gordon Kane. Basic Books, 2001.
- Суперсимметрия в CERN: <http://home.web.cern.ch/about/physics/supersymmetry>