

Ловушка физиков — XXI

Кандидат
физико-математических наук

С.М.Комаров

Где собираются восемнадцать, там появляется девятнадцатый. Почему так? Почему все места разные, хотя между ними нет никакого расстояния? Звезды — холодные, почему?

Роберт Шекли. Верный вопрос

Эксперименты, которые пройдут на Большом адронном коллайдере должны ответить на пять фундаментальных вопросов, волнующих современных физиков. Вопросы эти таковы: что есть масса? существуют ли в нашем мире скрытые пространственные измерения и суперсимметрия частиц? что собой представляет темная материя? почему наш мир состоит из вещества и в нем совсем нет антивещества? что было, когда во Вселенной еще не было вещества?



Художник Ю.Гукова

Материал подготовлен на основании доклада Карла Якобса, летняя школа в ЦЕРНе, 2006, и Роджера Форти, летняя школа в Сан-Паулу, 2007.



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

ускорителя, многие научные репутации будут безнадежно испорчены, и на горизонте возникнет мрачный призрак эфира, казалось бы надежно заговоренный в начале прошлого века.

Чтобы этого избежать, надо тщательно спланировать эксперименты. Как это будет сделано?

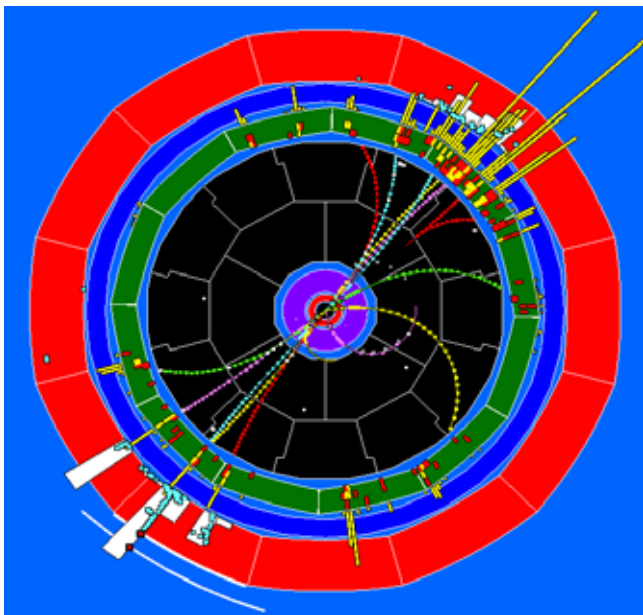
Создание массы

Бозон Хиггса играет во всей Стандартной модели чрезвычайно важную роль. Он считается квантом поля Хиггса. А это поле есть не что иное, как то, что придает всему существу, прежде всего элементарным частицам, массу. Гипотезу о его существовании шотландский физик Питер Хиггс выдвинул в 1964 году. Согласно ей, масса возникает как результат взаимодействия частицы с полем Хиггса. Образно говоря, оно налипает на частицу, как грязь на ботинок. Причем на каждую частицу поле налипает по-своему. Почему так получается, физики сказать не могут. Более того, прежде чем всерьез рассуждать на эту тему, хорошо бы, во-первых, убедиться, что гипотеза верна, а во-вторых, узнать какие-то характеристики этого поля. Одной из главных характеристик как раз и считаются свойства бозона Хиггса, а именно его энергия, время жизни, обстоятельства рождения и тот набор частиц, который получают при его распаде. Ищут этот краеугольный бозон давно, и, согласно накопленной статистике, его масса лежит в пределах от 110 до 250 ГэВ. А значит, заявленная для Большого адронного коллайдера энергия столкновения должна обеспечить рождение бозона Хиггса.

Считается, что бозон Хиггса может получаться несколькими способами, например слиянием двух глюонов, слиянием двух Z- или W-бозонов или как побочный результат рождения одного из этих бозонов. В зависимости от обстоятельств, его рождение может сопровождаться струями других частиц, а может и не сопровождаться. Эти струи проявляют себя в виде сильного свечения, которое одновременно возникает примерно в противоположных сторонах детектора, причем в различных его слоях. Распадаться же бозон Хиггса тоже может по-разному. Если он тяжелый, то в конце концов из него получатся два мюона и два антимюона. Если легкий — то прелестный и антипрелестный кварки, которые в результате фрагментации породят струи. Однако самым лучшим способом поиска бозона Хиггса считается реакция распада на два гамма-кванта, которые разлетаются в противоположных направлениях. Эта реакция случается весьма редко, зато ее ни с чем невозможно спутать, а измерить энергию, то есть массу бозона Хиггса, удастся точно.

Намеки на открытие бозонов Хиггса появились совсем незадолго до начала перестройки коллайдера в ЦЕРНе. Раньше в том же тоннеле сталкивались электроны и позитроны. Типичное событие при таком столкновении

Ответы на эти вопросы судьбоносны для физики. С одной стороны, если удастся подтвердить нынешнюю концепцию возникновения массы на основе поля Хиггса, найти суперсимметричные частицы или дополнительные измерения, умозрительные представления превратятся в прочные теории и послужат основой для дальнейшего движения в направлении, заданном работами Эйнштейна. В случае неудачи физиков ждут тяжелые времена: никто не даст денег на строительство более мощного



Так выглядел типичный результат столкновения электрона и позитрона в старом коллайдере ЦЕРНа во время эксперимента ALEPH. В центре произошло столкновение и родился Z-бозон. Он тут же распался на два кварка, полетевших в противоположных направлениях. Они вызвали каскад рождений и распада других частиц, при этом заряженные частицы под действием полей в канале ускорителя полетели по спиральям, а кванты излучения и незаряженные частицы — прямо. В зависимости от энергии они затормозились в разных слоях детектора, породив соответствующие вспышки. Посчитав энергию этих вспышек и их число, удается узнать, какова была масса исходного Z-бозона и порожденных им кварков

— рождение Z-бозона, который затем распадается на кварк и антикварк. Эти кварки разлетаются в противоположных направлениях и порождают две струи. Как раз накануне начала стройки удалось повысить энергию сталкивающихся частиц и получить три события с более сложными следами в виде четырех струй. Считается, что такие картинки могли возникнуть, если при столкновении родилась пара из Z-бозона и бозона Хиггса, которые распались каждый на свою пару кварков, причем кварки эти — разные. К сожалению, достаточную статистику набрать не удалось, хотя работу ускорителя и продлили на несколько месяцев: число событий так и осталось равным трем. Поэтому волнующее всех физиков действие прервалось на самом интересном месте, и пауза длится почти десятилетие: в общем-то, пока в мире нет ускорителей, в которых такие события случаются достаточно часто.

Суперсимметрия Хиггсов

С бозонами Хиггса тесно связана и задача поиска суперсимметричных частиц. Они появляются в следующей за Стандартной моделью теории, под названием теория суперструн. Согласно ее выводам, у нашего мира есть нечто похожее на обратную сторону: у каждой элементарной частицы имеется так называемый суперсимметричный партнер. Он выполняет те же функции, что и нормальный партнер, да вот только принадлежит к противоположной статистике: нормальному бозону соответствует суперсимметричный фермион, а фермиону — бозон. Этот подход не только позволяет навести видимость суперпорядка (в самом деле, почему все кванты полей бозоны, а частицы вещества — фермионы?), но и осуществить Великое объединение, а именно вывести из единого корня три из четырех известных физикам взаимодействий: электромагнитное, слабое и сильное.

Напомним, что единство электрического и магнитного взаимодействий в XIX веке своими изящными уравнениями доказал Максвелл. Следующее взаимодействие — слабое, в нем участвуют все элементарные частицы. Оно гораздо слабее электромагнитного и проявляется на расстоянии примерно в тысячу раз меньше диаметра ядра атома (а диаметр ядра атома, в свою очередь, примерно в тысячу раз меньше радиуса самой ближней к нему орбитали). Однако именно оно ответственно за распады элементарных частиц или взаимодействие ней-

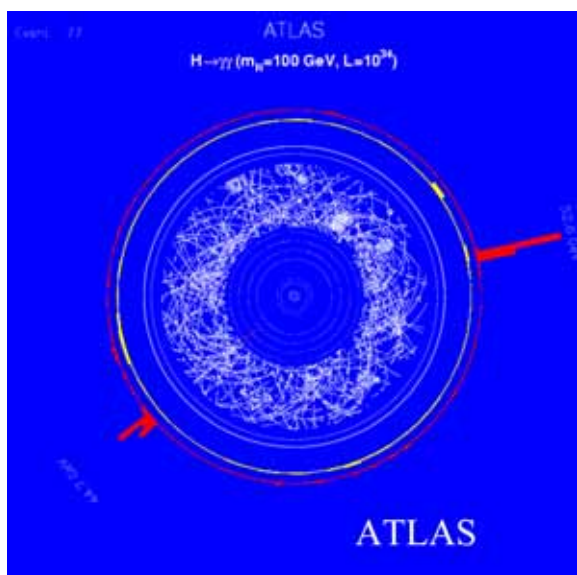
трино с веществом. Как установили в семидесятые годы XX века, единство электромагнитного и слабого взаимодействий проявляется, если энергия взаимодействующих частиц превышает сотни ГэВ, и такое состояние материи наблюдалось в первые 10^{-11} секунды после Большого взрыва. Считается, что потом возникло поле Хиггса, у бозонов, переносящих слабое взаимодействие, появилась масса, у фотона массы не возникло и с тех пор электрослабое взаимодействие проявляет себя в виде двух сил.

Расчет по Стандартной модели показывает, что сильное взаимодействие может объединиться либо только с электромагнитным, либо только со слабым. Если учесть, что электрослабое взаимодействие представляет собой единую силу — ни с одним из них. А правильно подобрав суперсимметричные поправки, удается объединить все три в одной точке: при энергии более 10^{14} ГэВ, то есть в течение первых 10^{-35} секунд с момента Большого взрыва.

Так вот, чтобы у физиков сошлись концы с концами, масса суперсимметричных частиц должна быть очень велика, в пределах 100—1000 ГэВ. Следовательно, легчайшие из них вполне можно обнаружить во время экспериментов на Большом адронном коллайдере (вспомним уже прозвучавшее в начале статьи значение 100 ГэВ как характерное значение энергий в нем).

В частности, вместо одного бозона Хиггса получается целых пять суперсимметричных бозонов: три нейтральных и два заряженных. Наличие такого разнообразия дает физикам очень широкие возможности для трактовки экспериментов, поскольку каждый из этих бозонов должен распадаться разными способами. Считается, что с параметрами, которые запланированы для Большого адронного коллайдера, есть шанс найти все пять суперсимметричных бозонов Хиггса, если они, конечно, существуют.

Кроме суперсимметричных бозонов Хиггса могут образоваться и какие-то другие суперсимметричные частицы, каждая из которых должна оставить свои следы, хотя до сих пор ни одного намека на такие следы заметить не удалось. Самая интересная для физиков частица — легчайшее нейтралито, аналог хорошо известного нейтрино. Считается, что это, во-первых, стабильная частица. Во-вторых, она способна к слабому взаимодействию, то есть хоть изредка, но взаимодействует с веществом. А в-третьих, ее масса велика. Поэтому если во время проведения опыта физики недосчитаются сотни-другой гигаэлектронвольт, то возникнут подозрения, что недостающую энергию унесло с собой не замеченное детекторами нейтралито. И за ним начнется настоящая охота. Причина такого интереса в том, что именно нейтралито считают самым лучшим кандидатом на роль темной материи: очень тяжелая, в сотню тысяч раз тяжелее протона, стабильная частица, которая взаимодействует с веществом, в общем, только гравитационно и, подчиняясь статистике Бозе—Эйнштейна, способна вместе с

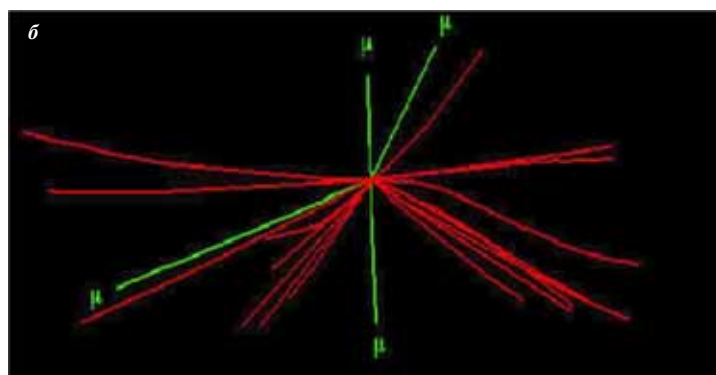
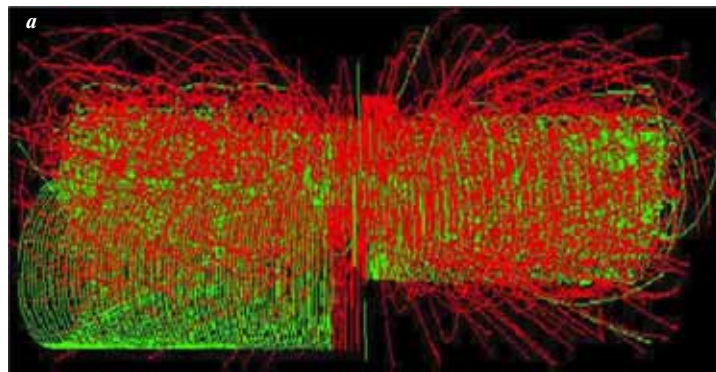


Как показывает расчет, если бозон Хиггса распадется на два гамма-кванта, детектор ATLASa даст такую картинку



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

В экспериментах на Большом адронном коллайдере будет получаться много частиц (а). Однако, убрав следы тех из них, которые легче выделить след распада бозона Хиггса в виде четырех мюонов (б)



себе подобными собираться в облака. Это очень похоже на обнаруженные астрономами свойства темной материи. Потому-то, доказав существование нейтралино, физики смогут вздохнуть с облегчением и сосредоточиться на изучении другой таинственной субстанции — темной энергии.

Вопрос о четности

Согласно физическому поверью, наш мир симметричен. В частности, у каждой частицы есть своя античастица — точно такая же, но обладающая иным зарядом, либо электрическим, либо барионным (должен же антинейтрон чем-то отличаться от нейтрона), либо еще каким. Кроме того, при отражении в зеркале свойства частицы меняться не должны. Именно благодаря этому поверью удалось построить саму Стандартную модель: поиск недостающих для полной симметрии частиц и привел в конце концов к идее, что все адроны построены из шести разноцветных кварков и что лептонов тоже шесть (см. «Химию и жизнь», 1991, № 4). Однако в этой идиллической картине есть огромный изъян: его размер в точности равен размеру Вселенной, которой, в общем-то, не должно существовать.

Во всяком случае, она не может быть наполнена веществом: в первые мгновения после Большого взрыва, когда возникало вещество, его должно было образоваться ровно столько же, сколько и антивещества. И они должны были друг с другом проаннигилировать, наполнив Вселенную чистым светом. Однако этого не произошло: небольшое количество вещества выжило. Сейчас оно составляет 10^{-10} долю от числа квантов излучения.

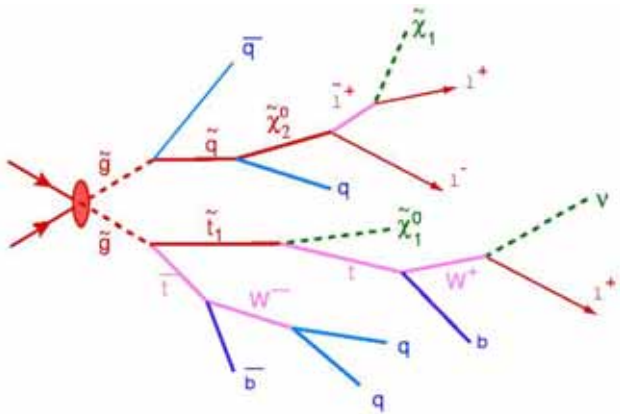
Чтобы выправить изъян, А.Д.Сахаров в 1967 году предложил гипотезу, согласно которой на Вселенную накладываются три условия. Во-первых, протоны должны быть стабильными. Оно и понятно — из чего бы состояло вещество, если все протоны распались? Во-вторых, в самом начале развития Вселенной должна быть инфляция — очень быстрое расширение, чтобы частицы вещества и антивещества, имеющие равные массы, не смогли объединиться в нейтральные пары с однородной плотностью. А в-третьих, должно существовать взаимодей-

ствие, нарушающее симметрию замены частицы на античастицу, что и приводит к нарушению первоначальной симметрии вещества и антивещества.

Впервые изменение свойств частиц при их отражении в зеркале, то есть нарушение пространственной симметрии, американские физики обнаружили в 1957 году: при распаде пи-мезона на мюон и нейтрино, а антипи-мезона на антимюон и антинейтрино все нейтрино получают с вращением влево относительно направления своего спина, а антинейтрино — только вправо. Положение спасло предположение, что сохраняется пара заряд—четность: в зеркале левовращающееся нейтрино должно увидеть в качестве своего изображения антинейтрино с правым вращением. Причиной нарушения симметрии было сочтено слабое взаимодействие.

Спустя семь лет оказалось, что и этот инвариант нарушается при распаде частиц с участием слабого взаимодействия. Так, превращение К-мезона в тройку антипи-мезон, антиэлектрон и нейтрино и в тройку пи-мезон, электрон и нейтрино проходят с немного различающимися вероятностями: 19,46% против 19,33% соответственно.

Окончательную точку поставили законченные в 2004 году многолетние опыты, которые проходили на коллайдерах в японской Цукубе и американском Стэнфорде, где две независимые группы исследователей обнаружили гораздо более значительные различия в распаде так называемых прелестных, или В-мезонов. Эти частицы были открыты в Корнеллском университете сравнитель-



Типичный след от реакции с рождением суперсимметричных частиц, которые обозначены тильдой, — три отдельных лептона, две струи от фрагментации тяжелых прелестных кварков, четыре струи от легких кварков и много потерянной энергии, которую унесли нейтрино и нейтралито

но недавно, в 1982—1983 годах. Свое название они получили за то, что построены с участием прелестного, или b-кварка. В-мезоны живут в среднем чуть больше полупикосекунд и за это время успевают несколько раз осциллировать, то есть превращаться в свою антипартнершу, а затем возвращаться в исходное состояние. И в любой момент осцилляции могут распасться на составляющие, в частности на пары мезонов: два пи-мезона, два K-мезона или пару из пи- и K-мезонов, причем последнее случается чаще всего. Анализ последствий распада более 200 миллионов пар В-мезонов и анти-В-мезонов показал, что в 910 случаях проходит распад первого с образованием K- и анти-пи-мезонов, и лишь в 696 случаях второй распадается на пи- и анти-K-мезоны. То есть различие превышает 13%! Поскольку каждый из этих распадов может идти по двум механизмам, где-то там и должно проявляться то взаимодействие, которое присутствует в третьем условии Сахарова. Считается, что оно имеет отношение к поведению кварков.

Отсюда понятно, почему возник столь сильный интерес именно к исследованию В-мезонов в Большом адронном коллайдере, что построили отдельный специализированный детектор LHCb. За год в коллайдере будет рождаться огромное число В-мезонов и анти-В-мезонов — 10^{12} пар. Поэтому физики надеются за обозримое время набрать достаточную статистику, понять, что же это за взаимодействие вмешивается в судьбу В-мезона, повышая стабильность его античастиц, и отгадать загадку нарушения четности в нашей Вселенной. По предварительным подсчетам, на это уйдет примерно пять лет измерений.

Возможно, из этих наблюдений получатся и какие-то иные результаты. Например, удастся получить большое разнообразие частиц, содержащих b-кварки (поскольку это тяжелые кварки, на менее мощных ускорителях их изучать не удавалось). Они могут распадаться как-то по-особенному. В том числе и совсем не так, как предсказано Стандартной моделью, что способно привести к долгожданной Новой физике — ее так ждут, что название пишут с большой буквы.

Зачем физикам пятое измерение

Разговоры о том, что в нашем мире, помимо известных трех пространственных и одного временного, есть дополнительные измерения, начались в 20-х годах XX века.

Тогда польский физик Теодор Калуца обнаружил, что если добавить в уравнение Эйнштейна для гравитации еще одно пространственное измерение, то окажется, что уравнение будет описывать еще и электромагнитное взаимодействие. Вскоре шведский физик Оскар Клейн на основании его идеи построил теорию гравитации, которая получила название теории Калуцы—Клейна.

Введение дополнительных измерений позволяет решить еще одну важную проблему. Дело в том, что гравитационная постоянная, известная нам из наблюдений в четырехмерном пространстве-времени, оказывается равна истинной гравитационной постоянной многомерного мира, деленной на характерный размер этого измерения. Поскольку этот размер предполагается малым, общая сила гравитации оказывается очень большой. То есть вполне сравнимой с силой электромагнитного взаимодействия. И это очень хорошо, потому что, как уже было сказано, физики любят симметрию, и то обстоятельство, что сила гравитации гораздо слабее трех остальных фундаментальных взаимодействий, которые в общем-то, сравнимы между собой по силе, физиков раздражает. Скрытые дополнительные измерения позволяют это раздражение снять.

Теория Калуцы—Клейна хороших экспериментальных подтверждений не нашла, однако в конце XX века эта идея получила развитие в теории суперструн: ей, чтобы свести концы с концами, понадобилось 6—7 скрытых измерений. Поскольку вопрос о причине слабости гравитационного взаимодействия так и оставался без ответа, поиск дополнительных измерений стал насущной необходимостью: если бы их удалось найти, и с гравитацией все стало бы хорошо, и теория суперструн, к огорчению ее противников, получила бы экспериментальное подтверждение.

Вообще говоря, дополнительные измерения в исходном виде представляют собой математический формализм, который слабо поддается физической интерпретации. Чтобы объяснить идею скрытых измерений, обычно пользуются методом аналогий. Например, возьмем лист бумаги. Как бы мы его ни согнули, обитающие на нем двумерные существа никогда об этом не узнают. Однако в трехмерном пространстве мы можем свернуть лист в рулон некоего диаметра. Вот этот диаметр для двумерных существ, которые живут на свернутой плоскости, и будет равен характерному размеру скрытого измерения. В многомерной теории вместо листа бумаги (мембраны) появляется понятие браны — четырехмерного подпространства многомерного мира, в котором сосредоточены все частицы Стандартной модели и, собственно, весь доступный нам в ощущениях мир. А вот гравитация действует и за пределами браны, и, стало быть, гравитоны — гипотетические переносчики гравитационного взаимодействия — брану способны покидать. Этим можно воспользоваться для поиска дополнительных измерений. Надо лишь найти, на каких масштабах нарушается закон тяготения, открытый Ньютоном.

Можно посчитать, что, если масштаб сил гравитации в многомерном мире имеет порядок ТэВ, тогда в мире с одним дополнительным измерением размер этого измерения (то есть диаметр рулона, в который свернут наш четырехмерный мир) составит 10^{15} см, что сравнимо с диаметром орбиты Сатурна. Поскольку на этих масштабах отклонений от закона Ньютона не замечено, видимо, измерений больше. Для двух измерений характерный размер составит миллиметр — на этих масштабах закон проверен. А вот для трех дополнительных из-

мерений размер исчисляется нанометрами. На этом масштабе никто закон Ньютона еще не проверял, что вызывает надежды.

В опытах на Большом адронном коллайдере дополнительные измерения будут искать, исходя из предположения, что гравитон может родиться совместно с одним глюоном, кварком или фотоном. Детектор зафиксировать гравитон не сумеет, но зато, измеряя энергию одиночного фотона или одиночной струи частиц, которая получится из кварка или глюона, удастся рассчитать энергию, унесенную гравитоном. Ну а дальше, исходя из полученных данных, судить, пропала ли вообще какая-то энергия, и унес ли ее гравитон, или что-нибудь другое.

Другим свидетельством наличия дополнительных измерений считается рождение микроскопической черной дыры. Если расчеты, которые базируются на теории известного английского астрофизика Стивена Хокинга, верны, то эта дыра должна испариться спустя 10^{-27} с после образования, породив множество самых разнообразных частиц с широким спектром энергий, которые разлетятся во всех направлениях. Во всяком случае, спутать это событие не удастся ни с чем. Отвечая на вопрос: «А что, если теория Хокинга не верна, и дыра станет не испаряться, а расти?», физики обычно говорят: на Землю постоянно падает поток космических лучей, энергия которых бывает и больше той, до которой будут разогнаны частицы в коллайдере. Значит, если при таких энергиях могут получиться черные дыры, они всенеизбежно получаются, однако ни к каким катастрофам это не приводит.

Кварк-глюонная плазма

Последняя цель, ради которой построен Большой адронный коллайдер, — создание и изучение нового вида материи, кварк-глюонной плазмы.

С начала своей истории человек знал четыре состояния вещества — твердое, жидкое, газообразное и плазма (в виде пламени костра). В XIX веке к ним добавилось пятое состояние — сверхкритический флюид. В XX веке было открыто шестое состояние — конденсат Бозе—Эйнштейна, который проявляется в двух ипостасях — сверхтекучей жидкости и конденсата газа сверххолодных атомов. На кончике пера открыто седьмое состояние — сверхплотная материя нейтронных звезд. А восьмое состояние должно было возникнуть спустя несколько мгновений после Большого взрыва. В отличие от нынешней, холодной Вселенной в те времена разнообразие частиц было гораздо меньше. Не было никаких барионов — ни слагающих ядра протонов или нейтронов, ни связывающих их друг с другом мезонов. Ничего этого не было. Возможно, не было и лептонов. А была равномерная и очень плотная смесь кварков и глюонов, не способных из-за большой энергии склеить кварки воедино. Именно это состояние материи и хотят промоделировать физики, чтобы посмотреть, как будет рождаться барионное вещество. Считается, что, когда температура Вселенной упала достаточно низко, в плазме кварков и глюонов начался фазовый переход — возникли пузыри адронного газа. Они способны породить последующие неоднородности в распределении вещества, следы которых можно попытаться найти, глядя вооруженным глазом на звездное небо.

Согласно расчету, критическое значение энергии кварков и глюонов, при которой они начинают конденсироваться в адроны, то есть барионы и мезоны, составляет



160—190 МэВ. Значит, для создания плазмы нужно, чтобы энергия удара для каждого нуклона превышала уже упоминавшуюся сотню ГэВ.

Первыми до таких энергий научились разгонять ионы золота и свинца синхротроны в Брукхейвенской лаборатории и ЦЕРНе. Этими ионами, а также ядрами водорода и дейтерия обстреливали неподвижную мишень и смотрели, какие частицы получаются. Намеки на то, что в результате действительно возникает некое новое состояние материи, получить удалось. Например, в опытах ЦЕРНа возникало гораздо больше частиц, содержащих странный кварк, нежели в опытах с меньшей энергией столкновений. Однако окончательного вывода о создании плазмы кварков и глюонов сделано не было.

Доказать факт образования кварк-глюонной плазмы не так легко, как это кажется на первый взгляд. В принципе вместо плазмы можно при столкновении получить газ, состоящий из адронов. С другой стороны, сама плазма после остывания тоже должна превратиться в такой газ. Свободные кварки и глюоны, выбитые из нуклонов при столкновении, при фрагментации порождают опять-таки потоки адронов. Во всех трех случаях получаются примерно одни и те же наборы частиц, поэтому выявить источник происхождения совсем не просто. Нужно проводить тонкие измерения.

Очередная возможность такого исследования появилась после того, как в Брукхейвенской лаборатории в 1999 году построили Релятивистский коллайдер тяжелых ионов. В отличие от предыдущих экспериментов, здесь сталкивались два потока быстрых ионов золота и энергия столкновений составляла 200 ГэВ на нуклон. Опыты показали, что в среднем на нагрев продуктов столкновения двух ядер золота тратилось 31—25 ТэВ энергии и при этом рождалось 5000 новых заряженных частиц и 2500 нейтральных. То есть по 20 штук на каждый нуклон.

Получаемая в результате столкновения материя действительно вела себя не совсем обычно. Это позволило физикам, проводившим эксперименты на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов, высказать мнение, что кварк-глюонная плазма в самом деле была получена.

После такого вывода, естественно, наступила пора тщательного исследования нового состояния материи. Именно этому и будет посвящены эксперименты на Большом адронном коллайдере, которые позволят получать гораздо большие энергии, а именно 5,5 ТэВ на один нуклон, то есть суммарная энергия столкновения ядер свинца составит 1144 ТэВ. Значит, капля плазмы просуществовать дольше и в ней удастся заметить еще больше интересных событий, которые позволят заглянуть почти в самое начало нашего мира.

