

# ГОД КОЛЛАЙДЕРА

Главные цели экспериментов на Большом адронном коллайдере – это:

- изучение происхождения массы (поиск бозона Хиггса);
- поиск темной материи (в том числе поиск SUSY частиц);
- поиск дополнительных пространственных размерностей (в том числе поиск гравитонов и микро-черных дыр);
- изучение материи (кварк-глюонной плазмы), которая образовалась после Большого взрыва.

Конечно, сегодня еще достаточно далеко до решения указанных задач. Прорыва можно ожидать через полтора-два года, а сегодня идут планомерные эксперименты с участием специалистов ОИЯИ на крупнейших установках ALICE, ATLAS и CMS.





Профессор, вице-директор Объединенного  
института ядерных исследований Рихард Ледницки

Так начал свой доклад на Комитете полномочных представителей Объединенного института ядерных исследований его вице-директор Рихард Ледницки. Целью профессора было рассказать о результатах экспериментов и научных достижениях за последний год работы БАК. К сожалению, мы не можем напечатать доклад целиком, хотя именно это дало бы полное и адекватное представление о происходящем на коллайдере. Но язык доклада доступен лишь специалистам. Поэтому мы предлагаем читателям адаптированное изложение, сделанное с помощью г-на Ледницки, которому выражаем самую искреннюю признательность.

В 2010 году на БАК достигнута суммарная энергия сталкивающихся пучков 7 ТэВ, в то время как проектная энергия вдвое больше – 14 ТэВ. И в этом, констатировал докладчик, одна из причин того, что решение поставленных задач откладывается, по крайней мере, до конца 2012 года. Почему же коллайдер не вышел на полную мощность? Дело в том, что вскоре после запуска случилась авария из-за плохих соединений сверхпроводящих супермодулей – их электрическое сопротивление оказалось больше, чем должно было бы быть. Поэтому

произошел нагрев, жидкий гелий превратился в газообразный и сверхпроводящие магниты взорвались. Отремонтировать удалось только половину кольца коллайдера. На эту половину была получена гарантия, что выход на полную мощность не приведет ни к каким неприятностям. Второе полукольцо, хотя вроде бы находилось в полном порядке, было опробовано лишь на 50 процентов мощности, поэтому выводить на энергию 14ТэВ всю установку не рискнули.

В данный момент БАК так и работает, поэтому его светимость в 10 раз меньше проектной. Термин «светимость», как пояснил для читателей Рихард Ледницки, характеризует интенсивность происходящих в коллайдере столкновений ускоренных пучков протонов или ионов. Число столкновений, или наблюдаемых, регистрируемых событий зависит от интенсивности – светимости, поэтому по ее величине можно предсказать, сколько интересных взаимодействий будут наблюдать экспериментаторы. Чем больше светимость, тем больше их количество, что очень важно: события идут непрерывно, но не во всех рождается то, чего ждут ученые. Вот и бозон Хиггса, как говорят физики, «имеет очень малое сечение», то есть вероятность его появления мала. Чтобы наблюдать рождение «хиггса», нужно иметь большие светимости, а для этого необ-

**LHC: The Large Hadron Collider**

The protons have not yet been accelerated to their full energy.  
You need to supply more energy by raising the accelerator handle...

SPS Ring LHC Ring

ALICE ATLAS LHCb CMS

SPS now at 306.0 GeV (68)%...  
Lift handle to accelerate the stream

particle physics for scottish schools

ходимо наращивать интенсивность сталкивающихся пучков и отслеживать огромное число событий.

Такова ситуация. Тем не менее, материалы экспериментов 2010 года представляют несомненную ценность. В основном, по выражению Р. Ледницки, «набирали протон-протонные взаимодействия, и только месяц в ноябре-декабре работали на тяжелых ионах свинца». Набранная коллайдером светимость позволяет сделать вывод, что полученные результаты уникальны для мировой науки, что никогда прежде на такие режимы не выходил ни один ускоритель. Для опытов на БАК характерна большая сложность событий и большая множественность образованных частиц. Их рождаются десятки тысяч, в основном, пи-мезонов, и разобраться в таком «столпотворении» совсем не просто. Помогает компьютерная обработка результатов. Картина события восстанавливается на основании рядов чисел, описывающих эксперимент. Раньше треки фиксировались водородными камерами или камерами Вильсона. Сейчас они не используются.

В соударениях «свинец-свинец», как сказал Р. Ледницки, прежде всего измерялась множественность заряженных частиц, которые рождались в одном взаимодействии. При этом

надо иметь в виду, что ядра свинца могут сталкиваться с разными прицельными параметрами: «лоб в лоб», под углом, по касательной. Большие множественности наблюдаются в центральных столкновениях. На БАК она примерно вдвое больше, чем при максимальной энергии брукгейвенского релятивистского тяжелоионного коллайдера RHIC. Уже это измерение позволило исключить целый ряд моделей, описывающих тяжелоионные соударения при более низких энергиях.

Оно также указывает на возрастающую роль коллективных эффектов с ростом энергии. С ее повышением ядра не взаимодействуют как независимые нуклоны. Коллективные эффекты похожи на те, что возникают при образовании кварк-глюонной плазмы, когда некоторая плотная среда или плотная материя как бы «добавляет» частицы сверх рождающихся в нуклонных взаимодействиях. Это дает важную информацию о пространственно-временных характеристиках возбужденной горячей и плотной материи (файрбола – «горячего мяча», по-русски), которая возникает в тяжелоионных соударениях высоких энергий.

Частицы генерируются в разных точках пространства-времени – «точках испускания». Это места столкновения двух



атомных ядер, места образования «горячей области». Изучение параметров файерболы ведется с помощью бозе-эйнштейновских (фемтоскопических) корреляций тождественных частиц. Получены указания на его стремительное расширение с коллективной скоростью, достигающей на его поверхности около половины скорости света. Надо сказать, что в основе корреляционной фемтоскопии лежит метод, заложенный в Дубне в начале 70-ых годов в работах Копылова и Подгорецкого. Из фемтоскопических измерений на БАК можно заключить, что файербол, образующийся на БАК, оказывается более горячим, живет дольше и расширяется до больших размеров, чем при более низких энергиях, таких как максимальная энергии бруквейвенского тяжелоионного коллайдера RHIC.

Эксперимент на БАК подтвердил, что горячая материя действительно расширяется. Причем чем дальше мы от центра, тем больше коллективная скорость, скорость разбегания. Для наблюдателя, находящегося в центре «горячей области», эта скорость равна нулю; для находящегося на периферии она максимальна. Так происходит в ускорителе ЦЕРН после столкновения ядер. Так происходит в масштабе Вселенной после Большого взрыва, когда разлетаются галактики. Подобие до-

статочно очевидно. Как и вывод: файербол – модель Большого взрыва, с которого началась Вселенная.

Эти эксперименты на БАК первоначально имели цель разобраться в пространственно-временной структуре источника, рождающего огромное количество частиц. Или, если Большой взрыв есть аналог файерболы, то в структуре Большого взрыва. Что ж, подвел итог Леднички, теперь мы знаем, что это не статический, а расширяющийся источник. Измерялось в эксперименте и время эволюции файерболы. Оказалось, что сначала при столкновении двух протонов или двух ядер образуется материя с настолько большими плотностями, что об испускании частиц говорить не приходится. Генерация начинается при охлаждении материи, когда ее плотность падает. Этот процесс называется «вымораживанием частиц». Время, которое проходит до момента вымораживания, называется временем эволюции. О нем ученые судят по продольному радиусу файерболы.

Что ожидали увидеть экспериментаторы, имевшие опыт работы на других ускорителях? Что с ростом энергии будет расти множественность частиц, сказал докладчик. В таком случае потребуется больше времени, чтобы дойти до некото-

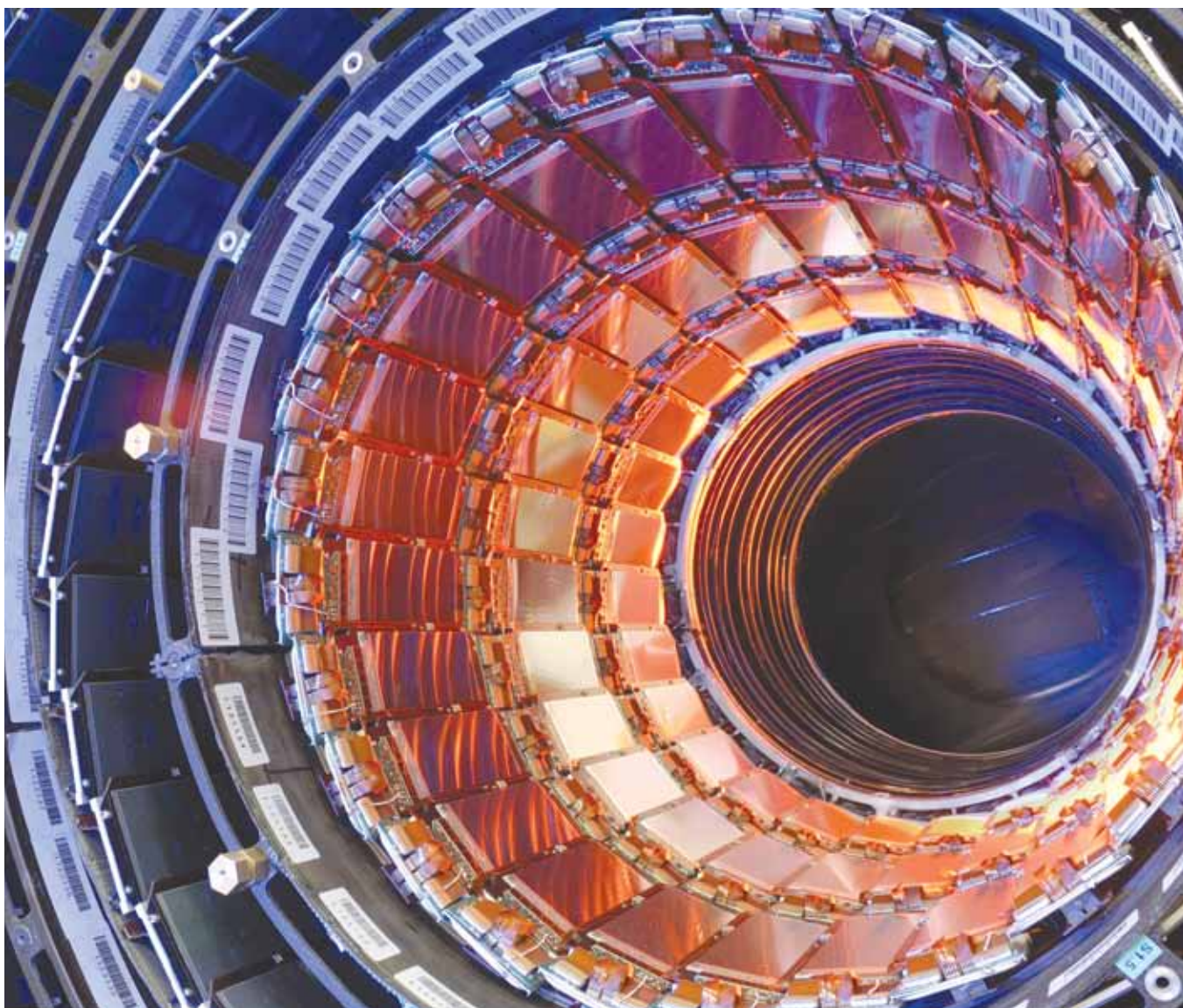


рой универсальной плотности вымораживания. Кроме того, поскольку с ростом энергии будет расти плотность материи, коллективная скорость (разбегания, расширения) окажется выше. Обобщая, существовали ожидания, что с увеличением энергии станут расти продольный и поперечный радиусы области столкновения (взрыва). В экспериментах на других ускорителях выяснялось, что растет только продольный, то есть увеличивается время эволюции материи, что, по словам Р. Ледниcki, понятно: так как первоначальная плотность горячей области высока, на превращение ее в частицы уходит больше времени. А что показали аналогичные измерения на БАК? Они подтвердили логику рассуждений физиков: здесь стали расти оба радиуса. Следовательно, рождающаяся материя проходит через стадию фибрилла только начиная с очень больших энергий, только с них начинается кварк-глюонная фаза. Интересно, что этот принципиальный результат получен всего за месяц исследований, что явно свидетельствует в пользу БАК и недвусмысленно говорит о его преимуществах по сравнению с лучшими ускорителями в ведущих научных центрах мира.

В свое время физики предполагали, что кварк-глюонная плазма будет походить по свойствам на идеальный газ. В самом

деле, чем ближе находятся друг к другу кварки, тем слабее они взаимодействуют друг с другом, тем больше оснований для построения модели протона как «мешка, набитого кварками», в котором кварки ведут себя как свободные субстанции, не отделяющиеся, однако друг от друга. Оказалось иначе. Оказалось, что кварк-глюонная материя близка по свойствам к идеальной жидкости. Это крупное открытие сделали физики Брукхейвена. Его подтвердили эксперименты на БАК. Одновременно ученые получили указание на то, что, возможно, придется менять парадигму, что с ростом температуры гидродинамика в чистом виде неприменима для описания процесса эволюции уже на довольно ранней его стадии.

Возвращаясь к поиску бозона Хиггса, Р. Ледниcki еще раз отметил, что наблюдения бозонов в экспериментах на БАК все-таки состоялись – калибровочных Z-бозонов, переносчиков слабого взаимодействия (аналогично тому, как фотоны переносят электромагнитное взаимодействие). В тяжелых столкновениях они реализуют некоторый способ оценки первоначального состояния фибрилла, того вещества, что рождается в результате соударения наряду с фотонами, используемыми для измерения температуры. С помощью Z-бозонов можно за-



глянуть в первоначальное состояние материи, что очень важно для понимания и описания ее дальнейшей эволюции.

В результатах экспериментов, по словам вице-директора ОИЯИ, содержится намек на то, что могут существовать дополнительные калибровочные бозоны, расширяющие стандартную модель, симметричные частицы и частицы, связанные с дополнительными размерностями пространства. С ними сопряжены также частицы, называемые гравитонами.

Что касается самого неуловимого «хиггса», то для его поимки светимости БАК пока недостаточно, поэтому решение задачи отодвигается на то время, когда коллайдер после полного ремонта начнет работать на полную мощность. Ремонт намечен на 2013 год, а за 2011-2012 годы БАК наберет светимость, которая с большой степенью уверенности позволит сказать, есть стандартный бозон Хиггса или его нет. Следует ли отсюда, что, в случае неудачи поисков, стандартная модель не годится? Минимальная – да, не годится, заявил вице-директор ОИЯИ. Однако есть более сложные модели, более сложные подходы. Достаточно простая картина, называемая стандартной моделью, будет нуждаться в сильном изменении. Она ведь действительно простая – с точки зрения происхожде-

ния массы, в нее заложен минимальный механизм происхождения массы кварков и лептонов. Ее можно усложнять, и если окажется, что стандартный механизм не работает, то придется этим заняться. Но, поскольку в природе обычно реализуются простые схемы, большинства физиков считает, что бозон будет обнаружен.

Потребуется ли для этого «новая физика», которая лежит за пределами стандартной модели? Она, в определении Р. Ледницки, есть стандартный набор частиц и набор стандартных взаимодействий. «Новая физика» – то, что превышает эти наборы. Если будет зафиксирована частица, которая никогда не проявляла себя при взаимодействиях гораздо более слабых, чем до сих пор наблюдавшиеся, то это будет указанием на возможность «новой физики». Сейчас же, по словам Р. Ледницки, обнаруживаются три семейства частиц, состоящих из разного вида наборов лептонов и кварков. Частиц сверх этих пока не найдено. При этом в некоторых моделях вводятся частицы, которые теоретически могли бы наблюдаться, однако не наблюдаются. Сегодня установлены некоторые границы поиска, за которые исследователи практически не выходят. БАК с его уникальными возможностями ото-





двинул их по сравнению с лучшими мировыми ускорителями, но все-таки ненамного. Прежняя чувствительность к «новой физике» на БАК превзойдена. И все же нет ни малейшего намека на обнаружение каких-то новых частиц.

С другой стороны, в течение всего одного года на БАК были зарегистрированы все частицы, обнаружение которых потребовало целых 60 лет. Этот факт показывает мощь экспериментальных установок коллайдера. Например, в эксперименте «АТЛАС» в составе огромной установки весом около 7 тысяч тонн слаженно работают несколько крупных детекторов. Это необходимо, чтобы в одном эксперименте за короткое время наблюдать частицы начиная от мюона и кончая топ-кварком. Частицы на «АТЛАСе» рождаются в больших количествах. Но известные, не новые.

Испытывает ли современная физика потребность в «новой физике»? Скорее, ее испытывает космология. Четверть всей материи Вселенной относится к так называемой «темной материи», о происхождении которой практически ничего не известно. Вероятно, разобраться в этой давней проблеме помогут бы открытия новых частиц, взаимодействующих так же слабо, как нейтрино. Что это могут быть за частицы, можно предположить исходя из суперсимметрии. Такие «кандидаты» есть, однако пока они себя не обнаруживают. Если это тяжелые частицы, то, возможно, для проявления не хватает энергии БАК. Тут нужны большие светимости, которых коллайдер еще не достиг. Правда, заметил докладчик, это самое простое объяснение, а значит, не обязательно верное.

Говоря о протон-протонных взаимодействиях. Р. Ледницки заметил, что пока экспериментаторы ре очень далеко продвинулись в проверке стандартной модели. Однако получены

ценные указания на то, что коллективные потоки, наблюдаемые в столкновениях ядер, имеют место и при соударениях протонов. Значит ли это, что кварк-глюонная плазма может образовываться уже при столкновениях элементарных частиц, характеризующихся большой множественностью? Вероятность этого большая.

В экспериментах 2010 года были также сделаны первые попытки обнаружить «микро-черные дыры». Перед пуском коллайдера высказывались опасения, что он породит множество «черных дыр», которые поглотят БАК, Женеву, Швейцарию, Европу и вообще всю Вселенную. На самом деле, эти «дыры» распадаются не успев родиться, причем – по типовому закону. О процессе должны свидетельствовать определенные параметры – угловые и импульсные характеристики. Экспериментаторы их искали, но пока удалось лишь очертить границы поиска. А вот попытки поставить пределы на «новую физику», экзотические частицы, возбужденные кварки ни к чему не привели.

На чем будут сосредоточены дальнейшие эксперименты? Главная задача, заключил Р. Ледницки, – засечь первоначальный след двух Z-бозонов, поскольку на них может распадаться тяжелый бозон Хиггса, а те, в свою очередь, на 4 мюона. Этот канал уже обнаружен, первое событие зафиксировано. Но тут необходимы продолжительные наблюдения. Поэтому принципиальная программа исследований на БАК в ближайшие два года фактически известна. За это время должны быть точно очерчены зоны поиска «хиггса», если, конечно, он не будет найден раньше. А после того, как в 2014 году коллайдер достигнет проектной светимости и энергии 14 ТэВ для протон-протонных взаимодействий, появятся условия для беспрепятственного обнаружения сигнала от бозона Хиггса в широкой области масс.





