

Перспективы исследований на Большом адронном коллайдере

В.Б. ГАВРИЛОВ,
доктор физико-математических наук
Институт теоретической и экспериментальной физики,
НИЦ “Курчатовский институт”

В 2012 г. в экспериментах на Большом адронном коллайдере (БАК) был обнаружен бозон Хиггса – последний недостающий элемент современной теории микромира. В 2015 г. завершена модернизация коллайдера, и



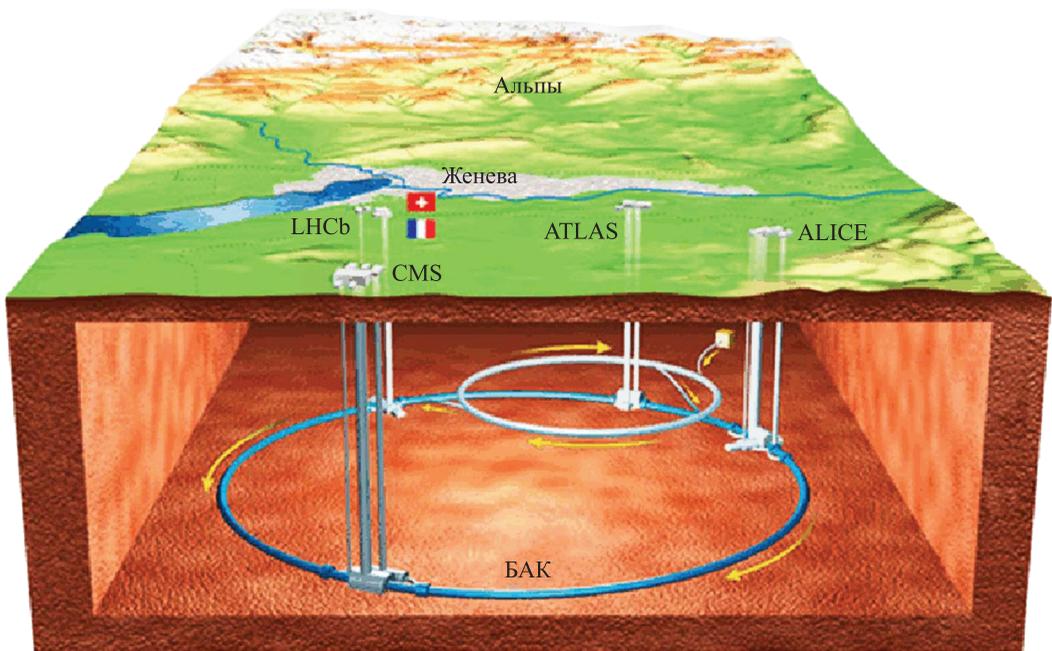
он начал работу при значительно большей энергии. В статье обсуждаются основные результаты, полученные на коллайдере ранее, и перспективы исследований после его модернизации.

БАК И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

В первой половине 2015 г. после двухлетнего перерыва начал работать Большой адронный коллайдер – самый мощный экспериментальный комплекс по исследованию фундаментальных частиц и их взаимодействий (Земля и Вселенная, 2008,

№ 6, с. 66–67; 2010, № 3, с. 37; 2013, № 2). БАК сооружен в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН), который находится на границе Швейцарии и Франции, недалеко от Женевы. Ускоритель размещается в тоннеле на глубине около 100 м под землей и представляет собой кольцо из 1624 сверхпроводящих магнитов,

охлажденных до 1,8 К, диаметром 27 км. В этом кольце пучки протонов, движущихся в противоположных направлениях, ускоряются до сверхвысоких энергий, а затем сталкиваются с суммарной энергией 14 ТэВ. В результате достигается максимальная на сегодняшний день энергия, что позволяет исследовать ранее не доступную



область взаимодействия субъядерных частиц.

Для регистрации частиц, образованных при столкновении протонов, в подземных залах расположены четыре основные экспериментальные установки ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus – тороидальный аппарат БАК), ALICE (A Large Ion Collider Experiment – эксперимент большого ионного коллайдера), CMS (Compact Muon Solenoid – компактный мюонный соленоид), LHCb (The Large Hadron Collider beauty experiment – красивый эксперимент БАК) и три вспомогательных детектора. Основная цель экспериментов ATLAS и CMS – поиск новых фундаментальных частиц и явлений, ALICE нацелен

на исследование столкновений ускоренных ядер, LHCb – на изучение распадов В-мезонов.

В экспериментах БАК регистрируются практически все вторичные частицы, образующиеся при столкновении протонов, за исключением тех, что вылетают под углами менее 1° по отношению к сталкивающимся протонам.

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Во второй половине XX в. оформилась современная теория фундаментальных частиц и их взаимодействий, получившая название “стандартная модель” (СМ). В основе СМ лежит квантовая теория поля, объединяющая сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия фунда-

Схема подземного кольца БАК с указанием расположения экспериментальных установок.

ментальных частиц с неизвестными составляющими. Такие частицы, как протон и пи-мезон, считавшиеся в 1950-х гг. и начале 1960-х гг. “элементарными”, оказалось, состоят из кварков и глюонов, связанных сильными взаимодействиями.

Стандартная модель включает 17 типов фундаментальных частиц, объединенных в четыре группы: кварки, лептоны, калибровочные бозоны и бозон Хиггса, стоящий особняком. Кварки обладают спином $1/2$ и дроб-

| | | | | | |
|----------------|--|--|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| масса → | $\approx 2,3 \text{ МэВ}/c^2$ | $\approx 1,275 \text{ ГэВ}/c^2$ | $\approx 173,07 \text{ ГэВ}/c^2$ | 0 | $\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$ |
| заряд → | 2/3 | 2/3 | 2/3 | 0 | 0 |
| спин → | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 0 |
| | u верхний | c очарованный | t истинный | g глюон | H бозон Хиггса |
| Кварки | $\approx 4,8 \text{ МэВ}/c^2$ | $\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$ | $\approx 4,18 \text{ ГэВ}/c^2$ | 0 | |
| | -1/3 | -1/3 | -1/3 | 0 | |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | |
| | d нижний | s странный | b прелестный | γ фотон | |
| | $0,511 \text{ МэВ}/c^2$ | $105,7 \text{ МэВ}/c^2$ | $1,777 \text{ ГэВ}/c^2$ | $91,2 \text{ ГэВ}/c^2$ | |
| | -1 | -1 | -1 | 0 | |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | |
| | e электрон | μ мюон | τ тау | Z Z бозон | |
| Лептоны | $< 2,2 \text{ эВ}/c^2$ | $< 0,17 \text{ МэВ}/c^2$ | $< 15,5 \text{ МэВ}/c^2$ | $80,4 \text{ ГэВ}/c^2$ | |
| | 0 | 0 | 0 | =1 | |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | |
| | ν_e электронное нейтрино | ν_μ мюонное нейтрино | ν_τ тау нейтрино | W W бозон | |
| | | | | | Калибровочные бозоны |

Фундаментальные частицы Стандартной модели.

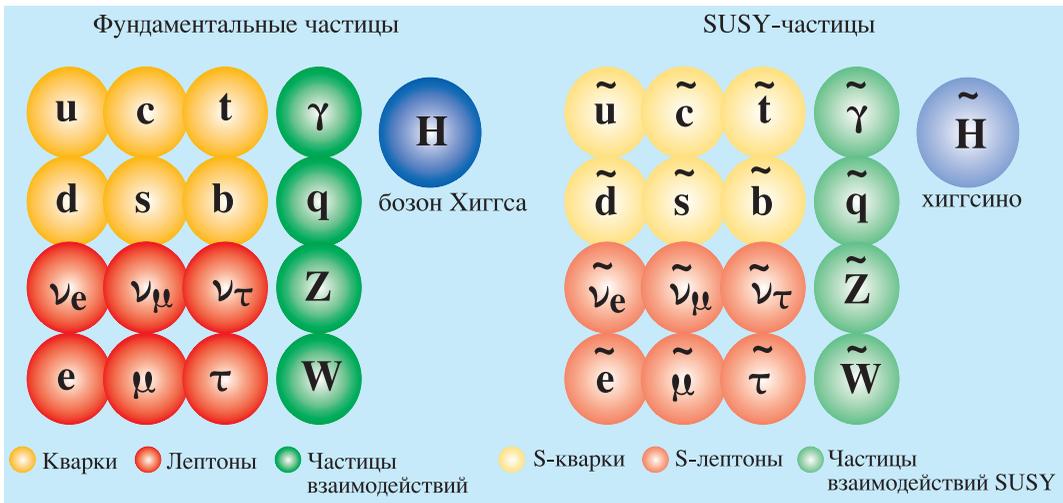
ним зарядом по сравнению с зарядом электрона. Протон и нейтрон содержат три легчайших (верхних и нижних) кварка, связанных глюонами – переносчиками сильных взаимодействий. Кварки и глюоны не могут находиться в свободном состоянии, а входят в состав сильновзаимодействующих частиц – барионов и мезонов. В группу лептонов входят электрически заря-

женные электрон, мюон и тау-лептон, а также электрически нейтральные нейтрино трех типов. В отличие от кварков, лептоны не участвуют в сильных взаимодействиях и могут находиться в свободном состоянии. За перенос электромагнитного взаимодействия отвечает фотон, за слабые взаимодействия – Z- и W-бозоны, за происхождение масс всех фундаментальных частиц – бозон Хиггса.

Наиболее эффективным инструментом для поиска новых фундаментальных частиц стали адронные коллайдеры. В них сталкиваются прото-

ны с протонами либо протоны с антипротонами, ускоренными до энергий, во много раз превышающих их энергию покоя. Впервые зарегистрированы Z- и W-бозоны на протон-антипротонном коллайдере ЦЕРН, топ-кварки на протон-антипротонном коллайдере в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США), бозоны Хиггса на БАК (Земля и Вселенная, 2013, № 2).

После открытия бозона Хиггса в СМ не осталось незаполненных вакансий для новых фундаментальных частиц, но это не означает, что надо прекратить даль-



нейшие поиски новых частиц. Хотя СМ и позволяет описать большинство из полученных данных, эта модель не применима для процессов, которые будут происходить при значительно более высоких энергиях. Вероятно, необходимо ввести в теорию, расширяющую СМ, частицы, ответственные за темную материю во Вселенной. Темная материя проявляет себя в различных астрономических наблюдениях (Земля и Вселенная, 2006, № 1; 2009, № 5; 2010, № 1; 2012, № 5). Со времен А. Эйнштейна ученых не покидает желание включить в единую теорию все виды взаимодействий, в том числе и гравитацию. Гравитация не входит в СМ и не играет заметной роли в процессах с участием фундаментальных частиц, идущих при достигнутых энергиях. Попытки решить указанные выше проблемы нашли

отражение во многих теоретических моделях, направленных на расширение СМ.

К одному из популярных направлений расширения СМ относятся "суперсимметричные" (SuperSymmetry, SUSY) модели. В SUSY-моделях фактически удваивается количество фундаментальных частиц, поскольку всем известным фундаментальным частицам соответствуют их суперсимметричные партнеры, фермионы (объекты с полуцелым спином) – бозоны (объекты с целым спином) и наоборот. В суперсимметричных моделях не возникает проблем при расчетах характеристик процессов, идущих при сверхвысоких энергиях, а легчайшая из новых SUSY-частиц может объяснить природу темной материи во Вселенной.

Желание создать единую теорию фундамен-

Фундаментальные частицы в SUSY-модели.

тальных взаимодействий, включающую гравитацию, привела к появлению струнных моделей. В этих моделях частицы описываются как струны в многомерном пространстве. Дополнительные пространственные измерения проявляются только на очень малых расстояниях и поэтому не наблюдались до сих пор.

Массы наблюдаемых ранее тяжелых фундаментальных объектов СМ (Z, W, t, H) и характеристики процессов, приводящих к их образованию, были уже предсказаны с той или иной точностью в СМ, прежде чем были экспериментально обнаружены. Что касается масс новых фундаментальных частиц, появляющихся

в разных расширениях СМ, то, в зависимости от значений параметров моделей, их величины могут быть в широких диапазонах. Поэтому, если не наблюдается новых частиц, можно лишь поставить ограничения на области параметров, которые противоречат эксперименту. То же самое относится к масштабу расстояний, на которых должны проявляться дополнительные размерности пространства в соответствующих моделях.

ЧТО РАНЕЕ ПОЛУЧИЛИ НА БАК?

Открытие бозона Хиггса и измерение его основных параметров – наиболее значимый результат исследований, проведенных на БАК в 2010–2012 гг. Зарегистрированы основные моды распада бозона Хиггса (ZZ , WW , $\gamma\gamma$, $\tau\tau$ и bb) и определены вероятности распада по этим каналам. Совместный анализ данных, полученных на установках ATLAS и CMS, позволил определить наиболее точное на сегодня значение массы бозона Хиггса, равное 125,09 ГэВ. По расчетам СМ, ширина бозона Хиггса с такой массой должна составлять около 4 МэВ, что значительно меньше, чем разрешение установок ATLAS и CMS, и поэтому она не может быть измерена по ширине пика в массовом распределении четырех лептонов. Наи-

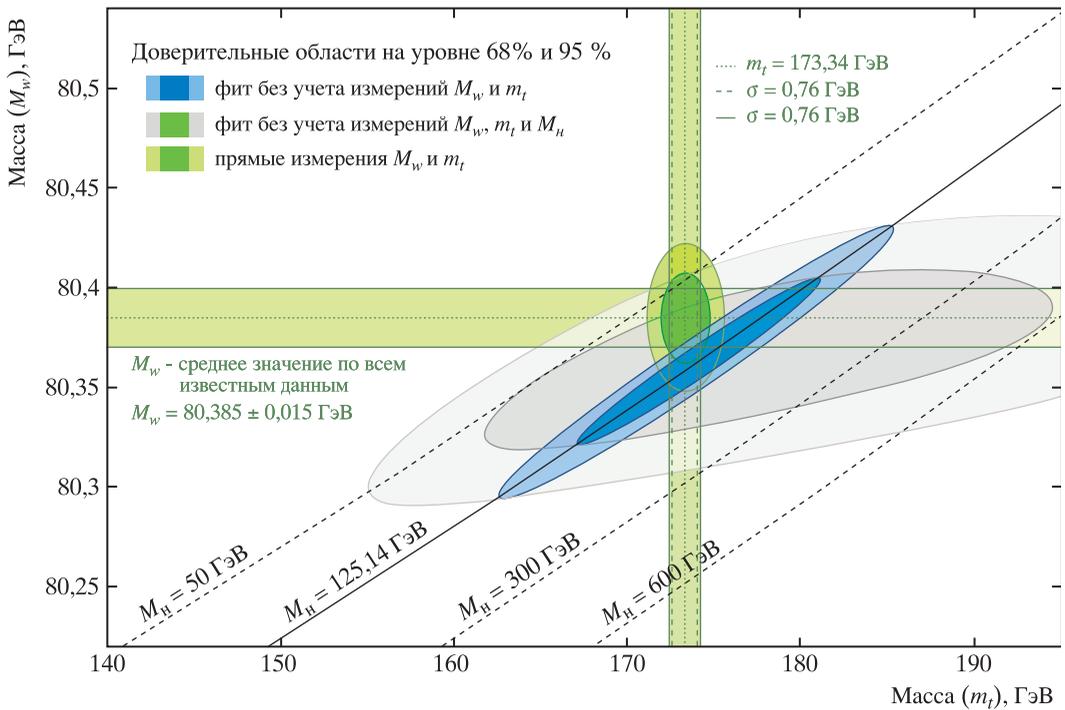
более строгое ограничение для ширины бозона Хиггса было получено в эксперименте CMS на основе анализа событий образования пары Z-бозонов с большой инвариантной массой. Установлено, что ширина бозона Хиггса на уровне достоверности 95% не превышает 22 МэВ. Исследованы его спин и четность, константы взаимодействия с другими частицами. Все свойства бозона Хиггса находятся в согласии с СМ в пределах экспериментальной точности.

Кроме бозона Хиггса искали новые частицы и процессы вне СМ, всевозможные проявления SUSY-моделей, образование суперсимметричных партнеров частиц СМ. При распаде SUSY-частиц в конечном итоге образуются легчайшие SUSY-частицы. Они стабильны и не регистрируются в детекторах, а могут только косвенно наблюдаться по присутствию большого недостающего поперечного импульса. Попытки обнаружить на установках ATLAS и CMS какие-либо процессы с образованием SUSY-частиц ни к чему не привели. Пришлось установить более строгие ограничения на области распространения их параметров, но еще остаются большие области этих параметров, в которых эксперименты на БАК оказываются нечувствительны.

Косвенным указанием на существование SUSY-частиц может быть отличие от предсказаний СМ вероятностей распада B_s мезона, состоящего из b- и s-кварков, на два мюона разных знаков. По расчетам СМ, его вероятность должна быть около 4×10^{-9} , то есть в среднем только четыре раза на миллиард. В случае SUSY-моделей вероятность такого распада предсказывалась гораздо большая для значительной области параметров. На протяжении многих лет поиски распада велись в различных лабораториях, но до БАК чувствительности коллайдеров не хватало. И только совместное рассмотрение результатов, полученных CMS и LHCb, указывало на достоверное наблюдение этого распада. Вероятность возникновения двух мюонов хорошо согласуется с СМ, что наложило дополнительные ограничения на область возможных параметров SUSY-моделей.

Поиск экзотических частиц и явлений вне рамок СМ, включая предсказанные в моделях с дополнительными пространственными размерностями, также не увенчался успехом, хотя и поставил новые ограничения на области разрешенных параметров в различных моделях.

В экспериментах БАК в области максимально доступных энергий изучены различные процессы СМ



и она подверглась проверке. Измерены сечения топ-кварков, Z- и W-бозонов. Образование адронных струй с большими поперечными импульсами позволило проверить квантовую хромодинамику в ранее не исследованной области. Результаты всех этих исследований согласуются с СМ.

В рамках СМ можно достаточно точно рассчитать соотношение между массами бозона Хиггса, топ-кварка и W-бозона, подтвержденное данными БАК.

МОДЕРНИЗАЦИЯ БАК

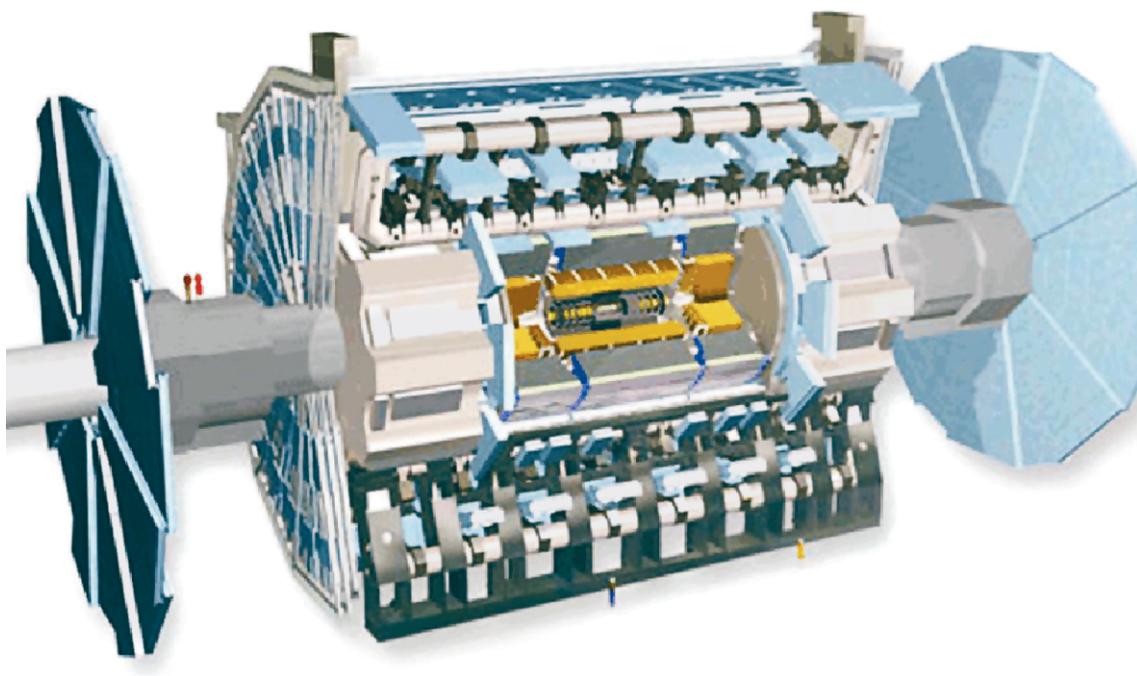
Основной целью останковки БАК на реконструкцию стало проведение работ, необходимых

для увеличения энергии сталкивающихся протонов. Максимальная энергия протонов в коллайдере определяется наиболее устойчивым магнитным полем в сверхпроводящих магнитах, которые удерживают протоны в пространстве. Если магнитное поле в сверхпроводнике превышает определенное пороговое значение, то сверхпроводимость нарушается и происходит отключение магнита. Происходит небольшое смещение сверхпроводящей обмотки в магните, в последующем включении магнит способен устойчиво функционировать при более высоком уровне магнитного поля в области пучка

Диаграмма Стандартной модели. Современный уровень точности измерений для соотношения масс бозона Хиггса, топ-кварка и W-бозона (пересечение синего и зеленого эллипсов) хорошо согласуется со Стандартной моделью.

протонов, чем до потери сверхпроводимости. Доведение магнитов до потери сверхпроводимости путем повышения тока в сверхпроводящих обмотках называется “тренировкой” магнитов.

Первоначальное значение максимального магнитного поля в области пучка немного отличалось для разных



Устройство экспериментальной установки ATLAS Большого адронного коллайдера. В центре установки расположены трековые детекторы, окруженные электромагнитными и адронными калориметрами. Во внешней части установлены мюонные камеры.

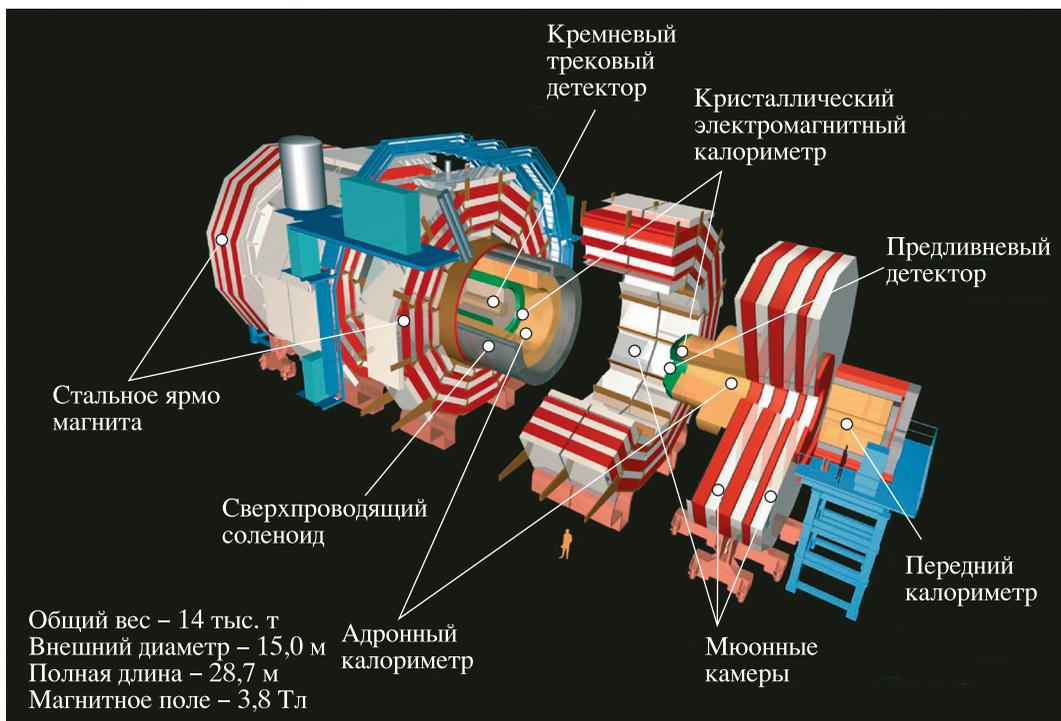
магнитов БАК, поэтому потребовалось провести множество циклов настройки магнитов, чтобы добиться их устойчивой работы для удержания протонов с энергией 6,5 ТэВ в каждом из сталкивающихся пучков.

При нарушении сверхпроводимости в обмотках магнита электрический ток из сверхпроводника перенаправляется в медные шины, которые

окружают сверхпроводник. В такой момент на эти шины приходится значительная нагрузка, максимальная в области соединения медных шин соседних магнитов. Чтобы избежать чрезмерного разогрева контактов шин соседних магнитов, потребовалось значительно их укрепить по сравнению с 2012 г., когда энергия протонов составляла 4 ТэВ. Поскольку устранение мелких неполадок БАК и укрепление контактов шин велось при комнатной температуре, а разогрев и охлаждение магнитов требует много времени, все заняло около двух лет. В настоящее время системы БАК и установки приведены в рабочее состояние, выполняется их

комплексная проверка с пучками протонов.

Одновременно проводилась модернизация экспериментальных установок. В установке ATLAS добавлен слой кремниевых трековых детекторов, расположенных в непосредственной близости к месту столкновения пучков. Специалисты смогут точнее регистрировать распады короткоживущих частиц в точке их образования. В торцевых областях CMS смонтированы внешние мюонные камеры, они помогут лучше отделять от фонов сигналы мюонов. Во внешнем центральном адронном калориметре гибридные вакуумные фотодиоды заменили на кремниевые фотодетекторы, нечувствительные



к магнитным полям. Все установки дополнены вычислительными станциями для быстрого отбора сигнальных событий, регистрируемых для дальнейшей обработки и анализа. Вычислительные станции повысили мощность каналов связи установок с центральным вычислительным комплексом ЦЕРН, это увеличит число записываемых событий.

ПЛАН РАБОТ БАК

В настоящее время завершилась подготовка БАК к работе на всех установках. Проведены проверки столкновений протонов при минимальной энергии – по 450 ГэВ в каждом из пучков, а

затем при энергиях по 6,5 ТэВ. С такой энергией БАК будет функционировать в 2015 г.

Следует отметить, что ускоренные протоны в БАК формируют сгустки по 10^{11} протонов в каждом и именно эти группы протонов встречаются внутри установок. После проверки всех систем БАК на первом этапе были ускорены протоны всего в нескольких сгустках и проведены их столкновения. Затем количество групп доведут до 1300 в каждом из пучков, и некоторое время БАК продолжит исследования в таком режиме, так как необходимо проверить работу узлов установок и произвести

Схема экспериментальной установки CMS и ее основных частей.

точную настройку их параметров.

На следующем этапе количество групп протонов в каждом пучке предполагается увеличить до 2592 – это расчетный параметр БАК. Таким образом светимость БАК увеличится до 10^{34} см⁻² с⁻¹, что соответствует примерно миллиарду столкновений в секунду. Во второй половине 2015 г. специалисты улучшили фокусировку и точность сведения пучков в местах их пересечения. К кон-

цу 2015 г. интегральная светимость БАК в установках ATLAS и CMS составила около 10 фемтобарн⁻¹ (фб⁻¹; 1 фемтобарн = 10⁻³⁹ см²), то есть примерно 10¹⁴ взаимодействий протонов в каждом из этих экспериментов. При этом удвоится количество зарегистрированных на БАК бозонов Хиггса.

Дальнейшая модернизация БАК пойдет в основном по пути увеличения светимости и повышения энергии протонов до расчетной величины – 7 ТэВ в каждом из пучков. Планируется набрать интегральную светимость примерно 300 фб⁻¹ к концу 2018 г. и примерно 3000 фб⁻¹ к середине 2030-х гг.

ЧТО ОЖИДАЕТСЯ?

В 2015 г. на БАК будет увеличена энергия пучков протонов с 4 ТэВ до 6,5 ТэВ, но накопленная светимость в экспериментах ожидается примерно в два раза меньше, чем в 2012 г. Можно ожидать принципиально новых результатов в поиске явлений вне СМ, для наблюдения которых ранее не хватало энергии сталкивающихся протонов. В первую очередь это касается поиска SUSY-частиц в области масс, недоступных ранее, но определяемых при энергии 13 ТэВ. Возможно дальнейшее уточнение параметров бо-

зона Хиггса, поскольку количество событий с его образованием, вероятно, удвоится к концу 2015 г. Ученые проверят СМ в новой, пока еще не исследованной области энергий.

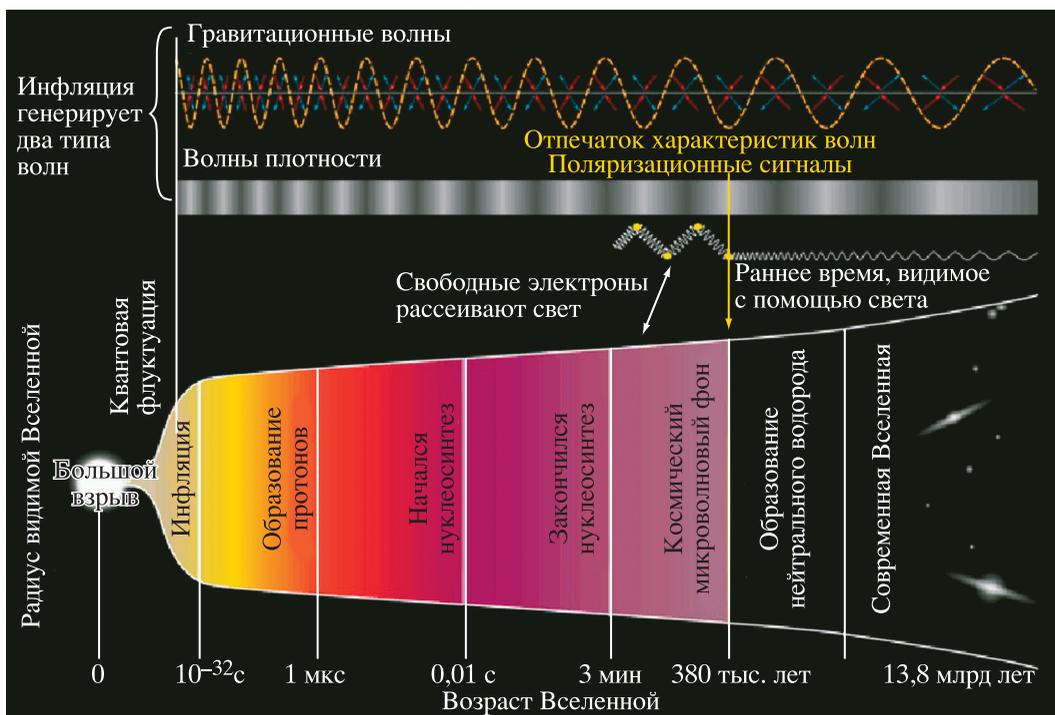
В последующие годы повышение светимости БАК значительно увеличит число событий образования бозона Хиггса. Это приведет к существенному возрастанию точности измерения его параметров и наблюдению редких распадов, например распада на два мюона, пока еще не зарегистрированного. Могут быть обнаружены новые частицы и явления вне СМ. Вероятность этих процессов очень мала, и для их регистрации требуется обеспечить значительно большее число столкновений протонов, чем это планировалось в 2015 г.

СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕР
СВИНЦА НА БАК

Кроме пучков протонов, на БАК можно ускорять ядра свинца. В этом случае достигается гораздо большая по сравнению со столкновениями протонов энергия в системе центра масс – 574 ТэВ. Хотя такое увеличение энергии не дает преимуществ для поиска частиц и явлений вне СМ, оно позволяет достичь максимальной плотности энергий в объеме, значительно превышающем размер протона.

Согласно современным представлениям об эволюции Вселенной, она образовалась около 14 млрд лет назад в результате Большого взрыва и с тех пор непрерывно расширялась (Земля и Вселенная, 2007, № 3; 2009, № 2; 2012, № 5; 2014, № 1). В период от 10⁻¹² до 10⁻⁶ с после Большого взрыва вещество во Вселенной находилось в состоянии кварк-глюонной плазмы (КГП), когда протоны и нейтроны еще не образовались, а кварки и глюоны могли свободно перемещаться в пространстве. В дальнейшем плотность вещества и энергии во Вселенной уменьшилась. Примерно через 10⁻⁶ с после Большого взрыва образовались протоны и нейтроны, а кварки и глюоны оказались запертыми в них.

При взаимодействии высокоэнергичных ядер свинца можно достичь условий, сходных с теми, что были в первые мгновения после Большого взрыва. При повышении энергии ядер возрастает температура в области взаимодействий. Наибольшая энергия достигается при лобовом столкновении ядер, плотность энергии достигла 10 ГэВ/фм³, а температура – примерно 300 МэВ, или 3 × 10¹² К. Эти параметры позволяют создать КГП и на БАК исследовать ее свойства.



Кварк-глюонная плазма, полученная при столкновении ядер, существует недолго, поскольку система быстро расширяется и охлаждается, что приводит к появлению большого числа вторичных частиц. Для исследования свойств КГП используются различные частицы с высокими энергиями, которые также образуются при столкновении ядер и успевают пролететь через область КГП до ее расширения и распада. Фотоны и Z-бозоны проходят через область КГП, практически не поглощаясь, а кварки и глюоны теряют энергию.

Повышение энергии столкновения ядер на БАК в 2015 г. по сравне-

нию с той, что была достигнута ранее, позволит исследовать КГП при еще большей температуре, то есть приблизиться к условиям, существовавшим в ранней Вселенной. Полученные на БАК данные о взаимодействии ядер свинца при максимально доступных энергиях позволят исследовать состояние вещества во Вселенной в период от 10^{-12} до 10^{-6} с после Большого взрыва. Поскольку астрофизические наблюдения не дают напрямую заглянуть в эту область, то результаты БАК помогут уточнить модель развития ранней Вселенной. Заметим, что реликтовое космическое излучение относится к периоду около 400 тыс. лет после

Схема расширения Вселенной после Большого взрыва. Показана эволюция состояния вещества в ранней Вселенной по мере ее расширения.

Большого взрыва, когда Вселенная остыла настолько, что произошла рекомбинация протонов и электронов в атомы водорода.

Одна из загадок ранней Вселенной – появление барионной асимметрии. По современным астрофизическим данным, все наблюдаемые космические объекты состоят из вещества, антивещества практически нет. Однако, согласно

модели Большого взрыва, кварки и антикварки в равном количестве присутствовали в КГП. Исследование взаимодействий частиц при высоких энергиях может помочь найти ответ на эту загадку.

После успешного обнаружения бозона Хиггса

и проверки СМ при энергии сталкивающихся протонов 8 ТэВ предполагается получить данные на энергии 13 ТэВ. Увеличение энергии позволит изучить неисследованную ранее область и, если повезет, увидеть, как устроен мир субъядерных частиц за рамками

СМ. Однако, в отличие от случая обнаружения бозона Хиггса, у нас пока нет четких предсказаний о том, какие новые процессы и частицы могут наблюдаться при более высоких энергиях и сколько протонов потребуются столкнуть, чтобы их увидеть.

Информация

“Кеплер” нашел Землю-2

В 20-ю годовщину обнаружения первой экзопланеты (1995) космической обсерватории “Кеплер” удалось найти в созвездии Лебедя планету и звезду – почти полные копии Земли и Солнца. Эта система находится в 1400 св. лет от нас. Звезда Kepler 452 относится к спектральному классу G2, но на 20% ярче и на 10% больше в диаметре, чем Солнце. Траектория движения Kepler 452b во-

круг звезды совпадает с орбитой Земли, год на экзопланете равен 385 земным суткам. Среда обитания на Kepler 452b имеет признаки сходства с нашей, то есть обладает всем необходимым для существования биологических организмов. По размерам она на 60 % больше Земли, ее возраст 6 млрд лет. В NASA предполагают, что жизнь на Kepler 452b вполне возможна.

К началу 2014 г., за 3,5 года работы по основной программе, каталог “Кеплер” насчитывает 4175 объектов, из более 3500 кандидатов 246 планет подтверждены различными научными группами исследователей. 14 мая 2014 г. обсерватория вышла из строя: сломался один из

трех гироскопов, а компьютер перешел в безопасный режим (Земля и Вселенная, 2014, № 5). Инженеры Лаборатории реактивного движения перевели “Кеплер” в особый топливосберегающий режим и поддерживают положение аппарата с помощью двигателей. Так может продолжаться достаточно долго – несколько лет. 30 мая 2014 г. стартовала новая миссия “K2”, которая представляет собой наблюдение за яркими звездами в плоскости эклиптики. С этого времени воскресшая обсерватория обнаружила на стыке созвездий Лебедя и Лиры дюжину планет, похожих по размерам на Землю.

Пресс-релиз NASA,
23 июля 2015 г.