

В ПОИСКАХ НАЧАЛА ВСЕХ НАЧАЛ

4 июля 2012 г. в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) состоялся расширенный семинар, на котором в присутствии приглашенных ученых и прессы было объявлено о том, что двумя независимыми группами исследователей, работающими на детекторах ATLAS и CMS, которые входят в состав Большого адронного коллайдера, был обнаружен бозон Хиггса. Эта частица играет ключевую роль в современной физике элементарных частиц, ее существование необходимо для непротиворечивого замыкания так называемой Стандартной модели – теории, которая в настоящее время дает наиболее глубокое и полное описание происходящих в микромире процессов. Потому обнаружение бозона Хиггса вызвало широкий резонанс и по праву может считаться историческим событием



ТИХОНОВ Юрий Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института ядерной физики СО РАН, руководитель группы ИЯФ СО РАН в детекторе ATLAS. Область научных интересов: физика элементарных частиц. Автор и соавтор 180 научных работ

Стандартная модель и бозон Хиггса

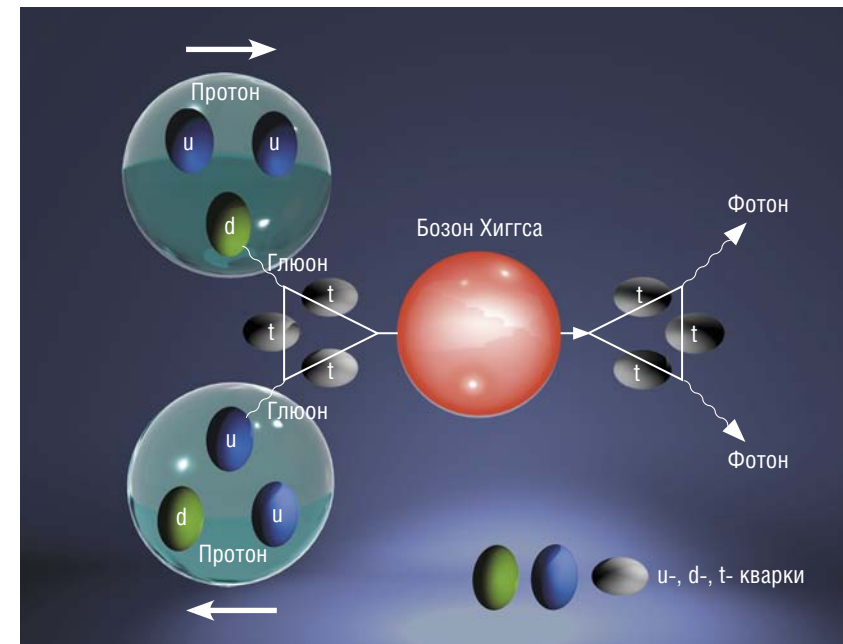
Знание о том, из чего состоит материя, что представляют собой ее самые мельчайшие частицы, лежит в основе понимания физических законов природы. Возникшее на заре развития науки понятие об атомах как неделимых частицах вещества со временем сменило представление о структуре атома, а затем ученые выяснили, что входящие в состав атомов протоны и нейтроны имеют собственное внутреннее строение. Есть ли предел делимости материи, каковы самые элементарные ее «кирпичики», как взаимодействуют частицы на элементарном уровне? Ответы на эти вопросы имеют философское значение и, конечно же, важны для практики.

Физика микромира, желание узнать, каков тот самый «первокирпичик», оказались очень тесно связаны с физикой макромира, астрофизикой, наукой о Вселенной. Сегодня существует достаточно прочно обоснованная теория происхождения Вселенной. Считается, что Вселенная возникла из бесконечно малой точки с очень большой энергией. Более 10 млрд лет назад произошел Большой взрыв, и первоначально все состояло только из элементарных частиц. Затем Вселенная начала расширяться, стали образовываться ядра атомов, потом атомы, а из них формировались планеты, звезды.

Есть в настоящее время и красивая, хорошо развитая физическая теория – Стандартная модель, которая объясняет явления, происходящие в микромире. Один из ее краеугольных камней – предположение о существовании так называемого бозона Хиггса. Оно позволяет связать вместе основные положения этой теории, объясняет появление у частиц массы. Понять, каким образом возникают массы у частиц, позволил механизм спонтанного нарушения электрослабой симметрии, предложенный 50 лет назад сразу несколькими исследователями. Именем одного из них, Питера Хиггса, была названа отвечающая за эти процессы частица с массой предположительно от 100 гигаэлектронвольт до тераэлектронвольт. Ее давно пытались

Ключевые слова: Стандартная модель, бозон Хиггса, нарушение электрослабой симметрии, ATLAS, CMS.
Key words: the Standard Model, Higgs boson, electroweak symmetry breaking, ATLAS, CMS

Сталкивающиеся в коллайдере протоны состоят из трех кварков (два u-кварка и один d-кварк), которые непрерывно испускают глюоны. При взаимодействии глюонов в момент столкновения рождается бозон Хиггса, распадающийся впоследствии на два фотона

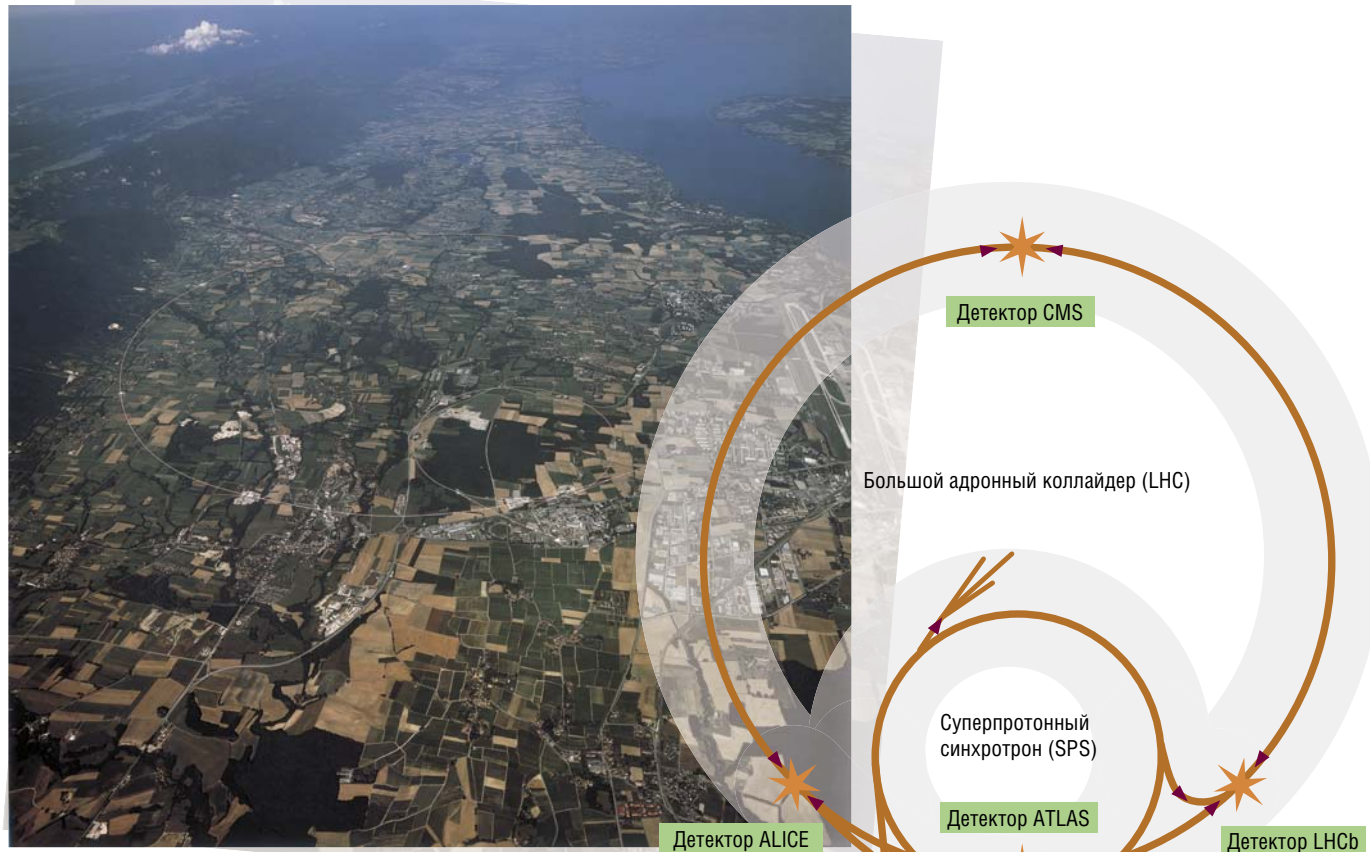


СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

Вещество состоит из двенадцати фундаментальных частиц, являющихся истинно элементарными, т. е. не имеющих внутренней структуры: шесть кварков (d, u, s, c, b, t) и шесть лептонов (электрон, мюон, τ-лептон и, соответственно, три сорта нейтрино). Все эти частицы – фермионы, их спин (собственный магнитный момент) равен $\frac{1}{2}$ (в единицах постоянной Планка). Частиц-переносчиков взаимодействия также двенадцать: восемь безмассовых глюонов – для сильного взаимодействия, три тяжелых калибровочных бозона (W^+ , W^- и Z^0) – для слабого взаимодействия и один фотон – для электромагнитного взаимодействия. Эти частицы обладают единичным спином и, следовательно, являются бозонами. Кварки участвуют во всех трех типах взаимодействий. Из кварков состоят адроны, которые подразделяются на две основные группы: барионы (состоят из трех кварков) и мезоны (из одного кварка и одного антикварка). Самые стабильные и поэтому наиболее распространенные в природе барионы – это хорошо всем известные протоны и нейтроны, образующие атомные ядра

БОЗОН ХИГГСА

В природе существует четыре фундаментальных, разных по «силе» взаимодействия: электромагнитное, слабое, сильное и гравитационное. Теории этих взаимодействий сначала развивались независимо друг от друга. Наибольших успехов в середине XX в. достигла квантовая электродинамика – теория электромагнитных взаимодействий, переносчиком которых является безмассовый фотон (свет). В теории слабых взаимодействий также наблюдался большой прогресс, но и в квантовой электродинамике, и в теории слабых взаимодействий существовали фундаментальные проблемы, которые невозможно было решить по отдельности. На предположении, что эти взаимодействия связаны друг с другом, построена замечательная теория – электрослабая модель Вайнберга-Салама. Однако из нее следовало, что переносчики слабого взаимодействия, W- и Z-бозоны, должны быть безмассовыми, а эксперименты показали, что они имеют массу и весьма большую. И тогда возникла идея ввести еще одно фундаментальное поле, квантом которого является бозон Хиггса. Взаимодействие этого поля с электрослабым полем придает W- и Z-бозонам массу, а фотон остается безмассовым. Зависимость потенциала хиггсовского поля от его напряженности была выбрана именно такой, чтобы реализовалось спонтанное нарушение симметрии. А далее естественным образом в эту схему введены фермионы (лептоны и кварки) – они также приобретают массу через взаимодействие с хиггсовским полем. Объединение электрослабой теории и теории сильных взаимодействий (квантовой хромодинамики) и стало так называемой Стандартной моделью



Большой адронный коллайдер находится под землей на границе Франции и Швейцарии, недалеко от Женевы. Он представляет собой систему кольцевых ускорителей, расположенных в 27-километровом кольцевом тоннеле, оснащенных детектирующими устройствами

СХЕМА РАБОТЫ БАК

В вакуумных камерах Большого адронного коллайдера навстречу друг другу обращаются пучки протонов (около 1300 сгустков в каждом направлении). Пучки сталкиваются в определенных местах, где установлена детектирующая аппаратура для регистрации рождающихся при столкновении частиц. На орбите протоны удерживаются с помощью сверхпроводящих магнитов. Каждый магнитный диполь длиной 15 м весит около 25 т. Магниты создают поле напряженностью более 8 Тл и работают при температуре 1,8 К, для чего необходима специальная система охлаждения сверхтекучим жидким гелием. Основным режим работы коллайдера – протон-протонные столкновения, но также в его конструкции предусмотрена возможность ускорения пучков тяжелых ионов, вплоть до ядер урана. Такую возможность обеспечивает установка электронного охлаждения тяжелых ионов, обеспечивающая накопление достаточного количества

ионов. Эта установка была разработана и изготовлена созданная в ИЯФ. На коллайдере построено четыре комплекса детектирующей аппаратуры, имеющих собственные имена: ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) и ALICE (A Large Ion Collider Experiment). С помощью двух максимально универсальных детекторов ATLAS и CMS исследуют взаимодействия элементарных частиц на предельно малых расстояниях. Именно с помощью этих детекторов ведут поиск бозона Хиггса



обнаружить, но параметры ускорителей не позволили этого сделать. Все остальные фундаментальные частицы, предсказываемые Стандартной моделью, уже открыты, например, W-бозоны и Z-бозоны обнаружены в ЦЕРНе в 1980-х гг. Столкновения протонов с очень большой энергией, возможно, позволили бы создать условия, существовавшие в нашей Вселенной в самом начале ее развития. Ученые надеялись, что в ходе этих экспериментов смогут появиться и частицы, которые тогда доминировали, в том числе хиггсовский бозон. Изучение процессов их возникновения и распада помогло бы проверить и подтвердить многие теоретические предположения об объектах микромира, составе материи, о происхождении Вселенной и, возможно, ее дальнейшей судьбе.

С этой целью в начале 1990-х гг. на границе Франции и Швейцарии, недалеко от Женевы, начали строить Большой адронный коллайдер (БАК). Это ускоритель тяжелых элементарных частиц, преимущественно протонов. Он позволяет при столкновении двух протонов достичь энергии до 14 ТэВ, рекордной для ускорительной техники на сегодняшний день. Большое значение имеет и интенсивность столкновений частиц в единицу времени – так называемая светимость. По этому параметру БАК также не имеет равных среди других коллайдеров. Два года назад после различных

Исследователи из Института ядерной физики СО РАН, принимавшие участие в экспериментах по обнаружению бозона Хиггса.

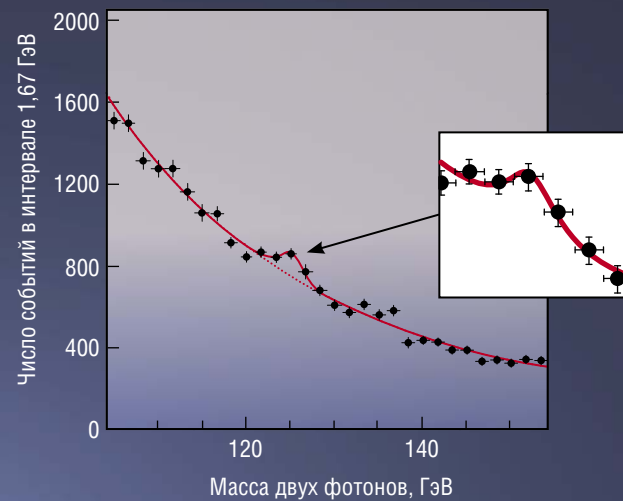
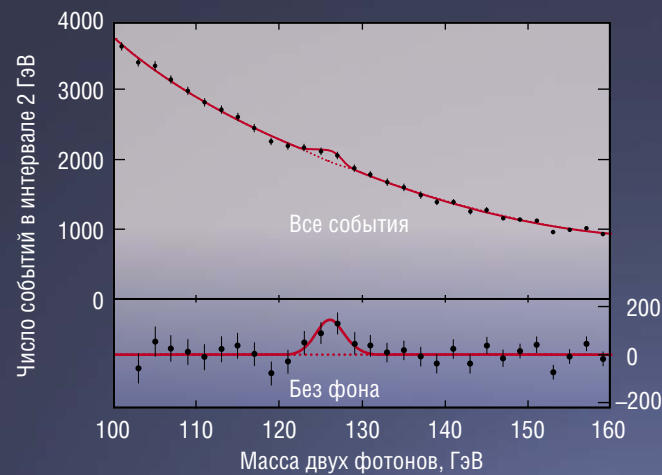
Слева направо:

А. Талышев, Д. Максимов, А. Анисенков, А. Сухарев, к. ф.-м. н. С. Пелеганчук, О. Белобородова, В. Бобровников, д. ф.-м. н. Ю. Тихонов, И. Орлов, А. Масленников

задержек, вызванных техническими причинами, он вступил в строй и очень быстро вошел в рабочий режим. Анализ накопленных за это время данных о столкновениях протонов позволил выделить события, связанные с рождением бозона Хиггса.

Научная конкуренция – основа достоверности

Существуют два больших эксперимента: ATLAS, в котором участвует и группа сотрудников ИЯФ СО РАН, и CMS, его своеобразный конкурент. На обоих детекторах изучаются сходные процессы, данные, полученные в ходе разных экспериментов, дополняют друг друга, делая заключения ученых более достоверными.



Данные 2011 и 2012 гг.

 Аппроксимация на основе Стандартной модели

 Полином 4-го порядка

Экспериментальные данные с детекторов ATLAS и CMS, говорящие о существовании частицы с массой 125 ГэВ, идентифицированной как бозон Хиггса

Предварительные результаты 2011 г. показали, что бозон Хиггса, возможно, действительно рождается при столкновении двух протонов, и его масса составляет примерно 125 ГэВ. Данные, набранные и суммированные в 2012 г., подтвердили эти выводы и значительно увеличили уверенность в том, что наблюдается действительно бозон Хиггса. Вероятность того, что наблюдаемые события, интерпретируемые как рождение бозона Хиггса, являются случайной флуктуацией других известных (фоновых) процессов, составила менее одной миллионной. Это позволило утверждать, что искомая частица открыта. Исторический факт был обнародован 4 июля 2012 г. в двух докладах ученых, занятых в экспериментах ATLAS и CMS, на специальном семинаре в ЦЕРНе. Знаменательно, что при этом присутствовал сам 83-летний Питер Хиггс.

Такие эксперименты – труд огромного коллектива, в каждом принимало участие от 2000 до 3000 человек: научные работники, программисты, инженеры, технический персонал и, конечно же, физики, занятые сложнейшим финальным анализом. Он состоит из многих частей, и на каждом его этапе значительна

КАК ИЩУТ БОЗОН ХИГГСА?

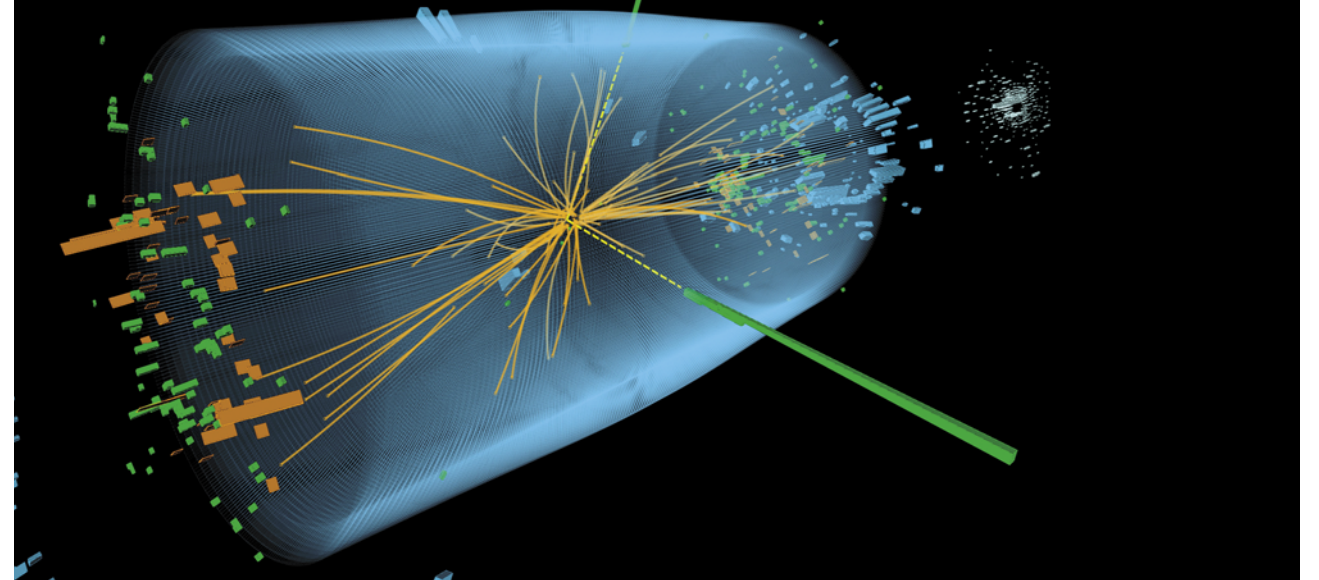
Каким именно образом из массы событий, регистрируемых детектором, выделяют рождение бозона Хиггса? На БАК за одну секунду происходит около 0,5 млрд реакций протона с протоном, и в каждой такой реакции рождается до 300 новых частиц. Всего за 2011—2012 гг. в столкновениях возникло более 10^{18} частиц. Из этого огромного количества частиц, по оценкам, бозонов Хиггса было всего около 10^5 шт.

Рождаемые частицы регистрируются различными элементами детектора, определяются их углы вылета, импульсы, энергии и пр., полученная информация переводится в цифровой вид. Сначала для подавления фона используется набор быстрых процессоров – триггеры разного уровня, которые отсеивают события, являющиеся очевидным фоном, после чего оставшиеся данные записываются на диски. Затем начинается трудоемкий процесс компьютерного анализа, при этом для поиска хиггсовского бозона используются характерные моды его распада. Наиболее продуктивными тут оказались каналы распада на два фотона и четыре лептона. Всего таких событий зарегистрировано несколько десятков, поскольку далеко не все из родившихся бозонов могут быть зарегистрированы и выделены из фона



Физики, работающие на детекторе CMS, изучают столкновения на Большом адронном коллайдере, чтобы узнать больше о Вселенной, в которой мы живем:

- Какова природа материи и основные силы?
 - Из чего возникло вещество (масса)?
 - Какова природа горячей плотной материи ранней Вселенной?
 - Что такое темная материя?
 - Имеет ли пространство дополнительные измерения?
- ЕСТЬ ЛИ У ПРИРОДЫ В ЗАПАСЕ СЮРПРИЗЫ ДЛЯ НАС?



На рисунке изображены зарегистрированные детектором CMS траектории частиц, родившихся после столкновения двух протонов

роль российских физиков. Россиян в ЦЕРНе сейчас около 500 человек, они полноценно участвуют в исследованиях от создания аппаратуры до проведения экспериментов и обработки результатов.

С самого начала Россия и научные учреждения Российской академии наук принимали непосредственное участие в создании Большого адронного коллайдера, общий вклад российской стороны составляет около 7%. В 1996 г. вышло специальное постановление правительства Российской Федерации, подписанное В. Черномырдиным, об участии нашей страны в этом проекте, научным институтам и промышленным предприятиям выделено около 100 млн долларов для разработки и изготовления различных элементов как коллайдера, так и детекторов. Кроме того, значительные денежные средства были получены из ЦЕРНа. В работе приняли участие ведущие научные центры России, такие как Институт ядерной физики СО РАН, Институт ядерных исследований РАН, Санкт-Петербургский институт ядерной физики, Физический институт им. П. Н. Лебедева, Санкт-Петербургский физико-технический

институт им. А. Ф. Иоффе, Институт физики высоких энергий, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» и др. Только сотрудники ИЯФ СО РАН разработали, изготовили, установили и наладили 360 дипольных и 180 квадрупольных магнитов для инжекционных каналов БАК, сверхвысоковокуумное оборудование, установку для электронного охлаждения тяжелых ионов и множество другой высокотехнологичной аппаратуры суммарным весом около 5000 т на сумму более 200 млн долларов.

Непознанного еще много

Исследования бозона Хиггса еще далеко не завершены. На сегодняшний день достоверно установлено, что наблюдаемая частица – бозон. Но предстоит набрать больше статистики, точнее изучить свойства этой частицы, чтобы доказать, что они именно таковы, как предсказано теорией. И хотя открытие бозона Хиггса – событие, значение которого трудно переоценить, это не единственная задача для Большого адронного коллайдера.



Детектор CMS (Compact Muon Solenoid – компактный мюонный соленоид) состоит из очень большого магнита, изготовленного из охлаждаемого жидким гелием сверхпроводящего материала, и детектирующих элементов различного типа. Предназначен для регистрации тяжелых частиц, рождающихся при столкновении протонных пучков

Стандартная модель, при всей ее красоте, имеет свои пределы применимости. Объясняя многие явления, она одновременно ставит перед физикой частиц новые вопросы, часть которых, вероятно, помогут решить эксперименты, проводимые с использованием БАК. К примеру, попытки вычислить радиационные поправки к массе самого хиггсовского бозона в Стандартной модели дают бесконечный результат. Для решения этой важнейшей теоретической проблемы предлагаются самые разные модели – наиболее популярна теория суперсимметрий, положения которой нуждаются в экспериментальном подтверждении.

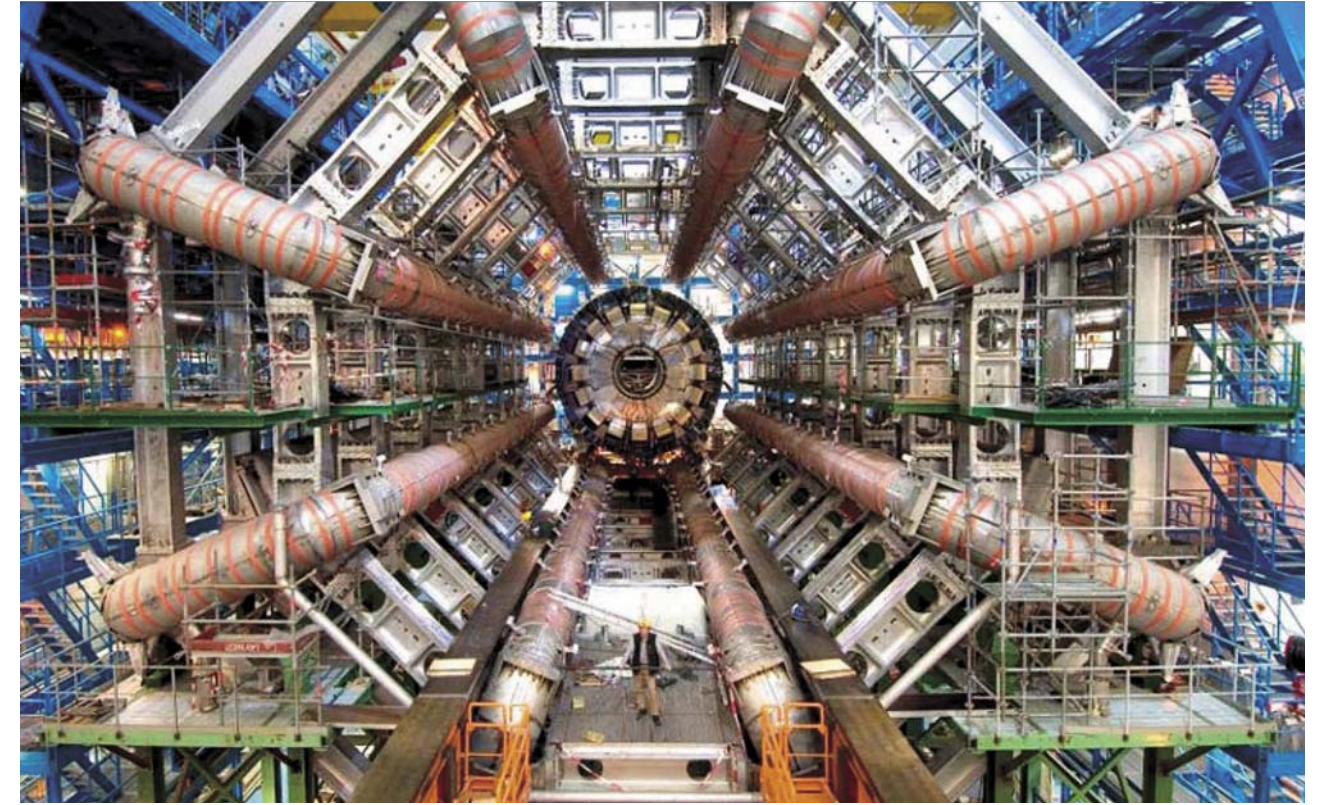
Важно отметить, что Стандартная модель предлагает механизм возникновения масс у частиц, но вовсе не дает объяснения природы «иерархии» масс частиц: масса нейтрино составляет лишь доли электронвольт, а масса t -кварка – сотни гигаэлектронвольт! Модель так называемых дополнительных размерностей претендует на решение этой фундаментальной проблемы,

и ее предсказания также проверяются в экспериментах на БАК.

Кроме того, в фундаментальной физике есть целый ряд нерешенных проблем – природа темной материи, природа асимметрии Вселенной: после Большого взрыва должно было образоваться одинаковое количество материи и антиматерии и с течением времени просто аннигилировать, но антиматерия не наблюдается в заметных количествах, преобладает материя, и пока не понятно, по какой причине.

Особая тема – поиск явлений, выходящих за рамки Стандартной модели, относящихся к так называемой «новой физике». В проводимых экспериментах рождается множество частиц, большинство которых, конечно, уже открыто. Но возможности Большого адронного коллайдера позволяют продолжить поиск новых, пока неизвестных объектов микромира.

Ученые теперь изучают совершенно новые явления при ранее недостижимых энергиях. В 2012 г. только



Детектор ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) выполняет аналогичные детектору CMS задачи, но имеет гораздо большие размеры, отличается конструкцией, расположением детекторов, напряженностью создаваемого отклоняющими магнитами поля

российскими специалистами, занятыми в эксперименте ATLAS, опубликовано около 70 научных работ. Не все из них посвящены таким ярким достижениям, как открытие бозона Хиггса, но и они расширяют наши знания о природе элементарных частиц, о том, как устроен мир, и что произошло более 10 млрд лет назад.

Сегодня для поиска явлений «новой физики» становятся актуальными прецизионные эксперименты на новых установках – электрон-позитронных ускорителях нового поколения с высокой светимостью в области энергий 0,3–12,0 ГэВ (супер e^+e^- -фабрики). Такие установки подразделяются на три класса: супер-В фабрики (7–12 ГэВ) – две уже сооружаются в Японии и Италии, кстати, в их проектировании принимали участие сотрудники ИЯФ СО РАН, супер-ф фабрика (0,3–2,0 ГэВ) – ее прототипом является ВЭПП-2000, созданный в ИЯФ, который после модернизации будет иметь необходимые параметры, и наконец, супер-С-Тау фабрика (2,0–7,0 ГэВ), проект которой также детально разработан в ИЯФ.

Так что научная жизнь не стоит на месте, и любопытство ведет ученых все дальше по пути познания. Мы не знаем, какие научные открытия еще будут сделаны, но совершенно ясно одно: человеческих усилий достаточно, чтобы понять основы устройства окружающей нас Вселенной. А практические результаты, полезные для повседневной жизни, будем надеяться, не заставят себя ждать.

Лумература

Readiness of the ATLAS Liquid Argon Calorimeter for LHC Collisions ATLAS Collaboration // Eur. Phys. J. 2010. C 70. P. 723–753.

Liquid argon calorimeter performance at high rates NIM A 669. 2012. P. 47–65.

Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Submitted to PLB 31/07/2012 <http://arxiv.org/abs/arXiv:1207.7214>.