

А.Е. БОНДАРЬ

# ПЕРЕД СТАРТОМ В МИКРОКОСМ

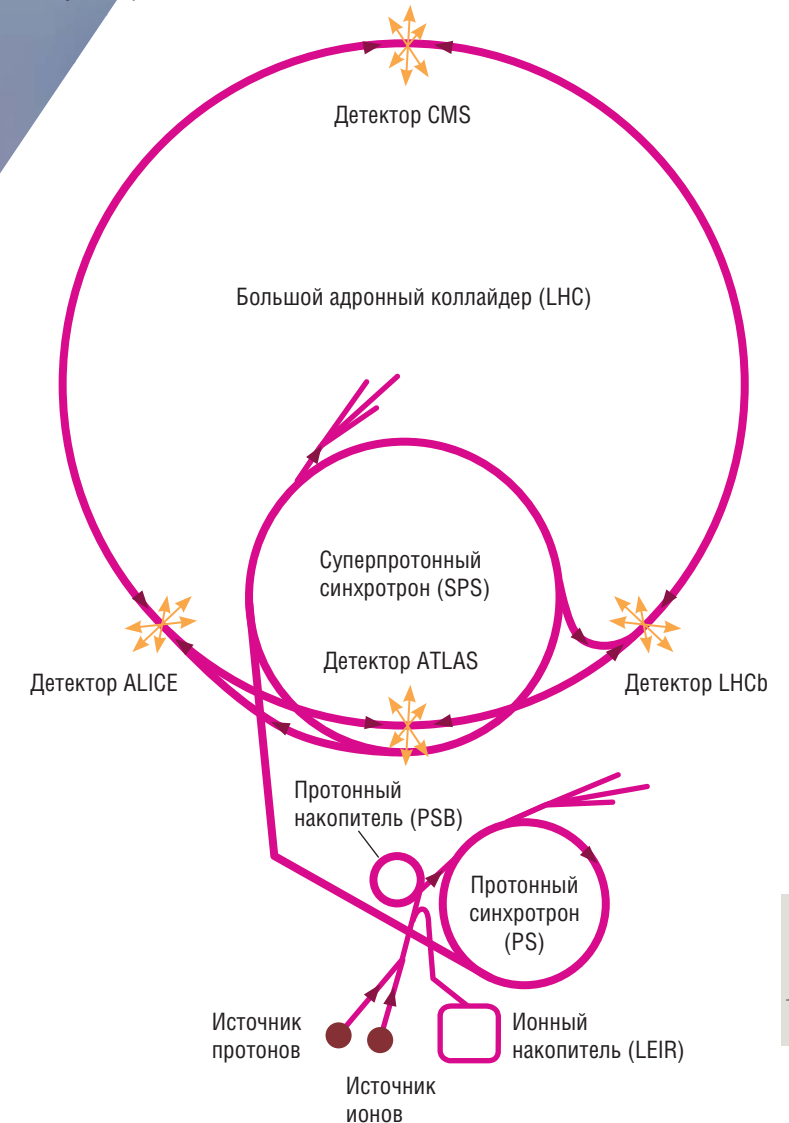
## Коллайдер готовится к запуску



БОНДАРЬ Александр Евгеньевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск), профессор НГУ. Член Комитета научной политики Европейского центра ядерных исследований. Область научных интересов: физика элементарных частиц. Автор и соавтор около 400 научных работ

**В** проекте Большого адронного коллайдера (коллайдер – это ускоритель со встречными пучками. – *Прим. ред.*) отразились все характерные особенности современной физики частиц. Эта область естествознания сегодня, как никогда ранее, имеет ярко выраженный интернациональный характер, интегрируя научно-исследовательские программы развитых стран мира. Проверка предсказаний существующих теорий, поиск и открытие новых фундаментальных частиц и закономерностей требуют создания ускорителей на предельно доступные энергии и регистрирующих приборов, способных обрабатывать в ходе эксперимента колоссальные объемы данных. Решение столь сложных задач по силам лишь большим международным коллаборациям ученых, специалистов во многих областях науки и техники, обладающим значительными интеллектуальными и материальными ресурсами и современными промышленными технологиями.

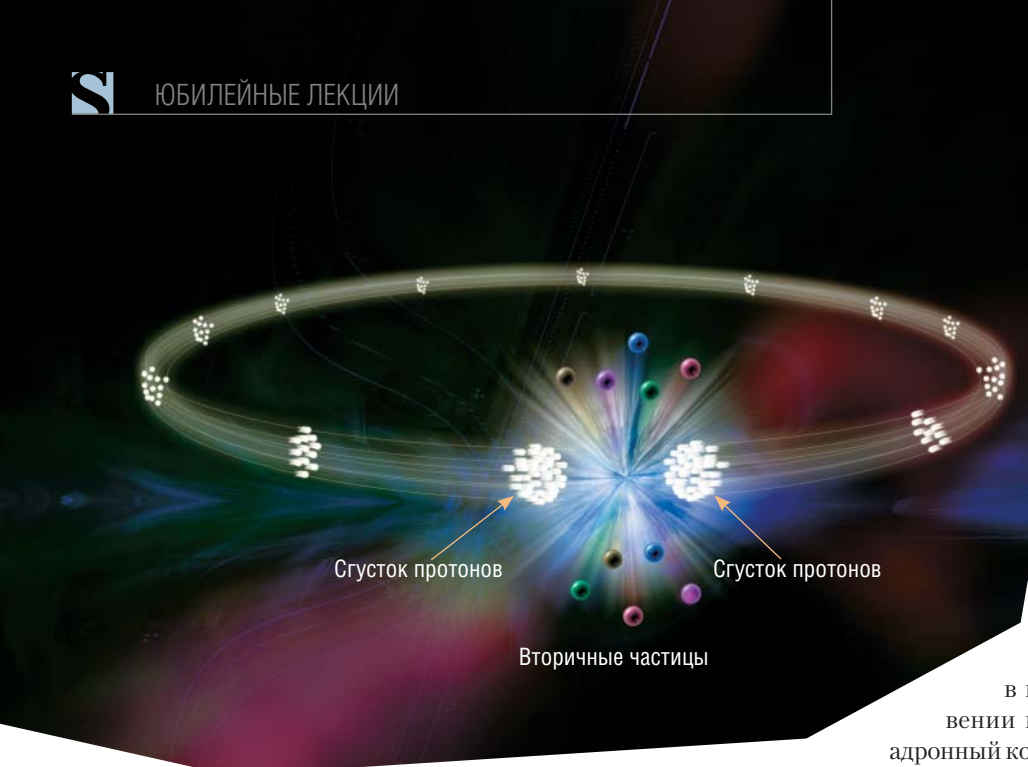
Ведущие научные центры России, такие как Институт ядерной физики СО РАН, Институт ядерных исследований, Петербургский институт ядерной физики, ФИАН, Петербургский физтех, Институт



Большой адронный коллайдер, построенный в ЦЕРНе, имеет длину окружности главного туннеля 27 км и в полной мере оправдывает свое название. В одной связке с ним будет работать целое семейство ускорителей, где частицы последовательно разгоняются до скоростей, предельно близких к скорости света. На схеме ускорительного комплекса относительный масштаб отдельных элементов не соблюден

В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) скоро должен начать работу новый ускоритель элементарных частиц под названием Большой адронный коллайдер (БАК). Эта экспериментальная установка отражает магистральное развитие науки, изучающей строение вещества на микроскопическом уровне.

Жажда человека узнать, как устроена материя, требует все больших энергий сталкивающихся частиц и все больших интеллектуальных и финансовых ресурсов. В международном проекте участвуют десятки стран и тысячи физиков и инженеров. Ускоритель под Женевой – самая крупная научная установка, когда-либо создававшаяся человечеством



вклад в мировую ускорительную науку, – академиком В. И. Векслера и Г. И. Будкера.

### Очень быстро, очень глубоко, очень холодно

До настоящего времени самым мощным в мире ускорителем был протон-антипротонный коллайдер в Лаборатории им. Ферми в США. На нем достигнута энергия 1 ТэВ в каждом пучке, т. е. при столкновении выделяется до 2 ТэВ. Большой адронный коллайдер в ЦЕРНе будет работать с протонными пучками в 7 раз большей энергии.

А чем больше энергия, тем меньшие расстояния становятся доступны ученым при исследовании физики микромира.

Что в самых общих чертах представляет собой БАК? Это 27-километровый кольцевой тоннель, пробитый в толще горных пород на глубине 100 м, в котором смонтирован собственно коллайдер. В одной связке с ним работает целое семейство ускорителей, где частицы последовательно разгоняются до скоростей, предельно близких к скорости света, совершая в большом кольце 11 тыс. оборотов в секунду!

Два пучка протонов обращаются навстречу друг другу в вакуумных камерах коллайдера (каждый – в своей) и сталкиваются в определенных местах. В точках встречи и будет происходить самое интересное. Удерживаются частицы в пучке с помощью сверхпроводящих магнитов. Каждый *диполь* – один из элементов системы сверхпроводящих магнитов – весит около 25 т и достигает в длину 15 м. Он создает магнитное поле напряженностью более 8 Тл и может работать только при температуре 1,8 К, для чего охлаждается сверхтекучим жидким гелием. Всего в коллайдере более 1200 таких диполей, и эту систему еще дополняют 860 *квадруполей* и более 6 тыс. корректирующих магнитов.

### Четыре четверти пути

Помимо коллайдера – физического устройства, сталкивающего частицы, для проведения эксперимента необходимы приборы, которые регистрируют продукты взаимодействия этих частиц. Дело в том, что в результате столкновений высокоэнергетичных протонов будут во множестве рождаться другие частицы, т. е. энергия исходных частиц будет расходоваться на образование

Два пучка протонов обращаются навстречу друг другу в вакуумной камере коллайдера и сталкиваются. Энергия частиц – 7 ТэВ в каждом пучке, т. е. при столкновении выделяется до 14 ТэВ. Эта энергия будет расходоваться на образование вторичных частиц, например пионов, каонов и, как надеются физики, совершенно новых, ранее не наблюдавшихся частиц.

При встрече двух протонных сгустков в среднем должно происходить около десятка протон-протонных столкновений – но в каждом рождается более тысячи вторичных частиц! Интервал между соседними сгустками, летящими в одном направлении, составляет всего несколько метров

физики высоких энергий, Курчатовский институт и другие, с самого начала активно участвовали в проекте. Один пример: только сотрудники ИЯФ СО РАН разработали, изготовили, установили и наладили 360 дипольных и 180 квадрупольных магнитов для инжекционных каналов коллайдера, сверхвысоковакуумное оборудование, электронный охладитель тяжелых ионов и множество другой высокотехнологичной аппаратуры суммарным весом около 5000 т!

На всех уровнях руководящих органов Европейского центра ядерных исследований неоднократно подчеркивалось, что вклад ученых, специалистов, институтов и предприятий России в проработку и реализацию проекта Большого адронного коллайдера исключительно велик. Это касается не только материально-технического обеспечения ряда ключевых позиций, но также использования передовых идей и достижений в физике частиц и технике ускорителей, ранее выдвинутых и развитых нашими учеными. Неслучайно две улицы в ЦЕРНе носят имена российских физиков, внесших основополагающий

новых, возможно ранее не наблюдавшихся частиц. Чтобы разобраться, что конкретно происходит в каждом событии, требуется сложный комплекс оборудования, который называется детектором.

Всего на БАКе построено четыре детектора, они имеют собственные имена: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) и ALICE (A Large Ion Collider Experiment). Почему четыре? Это связано с широтой научных задач, стоящих перед исследователями.

Охватить все направления при помощи одного, пусть и очень сложного, набора экспериментальной аппаратуры невозможно. Поэтому пошли по следующему пути: есть два детектора максимально универсальных – ATLAS и CMS, и они решают задачи на самом острие науки. Это физика взаимодействия элементарных частиц на предельно малых расстояниях (в том числе поиск бозона Хиггса и частиц темной материи). Детекторов два, потому что для надежности результатов, для возможности независимой перекрестной проверки лучше иметь две соизмеримые по возможностям установки.

Специализированный эксперимент LHCb направлен на углубленное изучение физических вопросов, связанных с современным пониманием симметрии в природе, симметрии между материей и антиматерией. Хотя такая симметрия, как мы знаем, лишь слегка нарушена, это нарушение приводит к фундаментальным следствиям в устройстве Вселенной.

Что касается ALICE, то это детектор, ориентированный на эксперименты с ионами, а не протонами. Таким образом, основной режим работы коллайдера – протон-протонные столкновения, но, кроме того, предусмотрен режим сталкивающихся пучков тяжелых ионов, вплоть до урана.

### Стандартная модель микромира

За последние 40 лет в физике частиц достигнут существенный прогресс. Что же мы сегодня знаем, а чего не знаем и хотим узнать на новой установке?

Существует четыре типа фундаментальных взаимодействий элементарных частиц. Электромагнитное – всем хорошо известно со школьной скамьи. Слабое взаимодействие ответственно за распады долгоживущих частиц, например  $\beta$ -активных ядер. За удержание *кварков* внутри *адронов* и адронов внутри ядер ответственно сильное взаимодействие. И наконец, обыденная гравитация, которая в масштабах микромира очень слабо проявляется, поэтому о ней можно временно забыть.

Современная теория, именуемая *Стандартной моделью*, рассматривает три фундаментальных взаимодействия – электромагнитное, слабое и сильное – как родственные явления. Хотя они заметно отличаются по своим свойствам, но, по-видимому, являются следствием некоего более общего взаимодействия в природе. Наша убежденность в этом крепнет, основываясь на успехах единого описания электромагнитных и слабых взаимодействий в *модели Вайнберга–Салама*.

Физики надеются, что глобальная теория однозначно свяжет сильное взаимодействие с электромагнитным и слабым. Вероятно, на гораздо меньших расстояниях, чем доступны пока в эксперименте, эти взаимодействия ведут себя универсально. Если знать эту более глубокую связь, можно будет с гораздо меньшим числом предположений описать все наблюдаемые явления в микромире.



Заряженные частицы (протоны, ионы) удерживаются в пучке с помощью системы магнитов. Стандартная секция коллайдера представляет собой сверхпроводящий магнитный диполь длиной 15 м и весом 25 т. Он создает магнитное поле напряженностью более 8 Тл и может работать только при температуре 1,8 К, для чего охлаждается сверхтекучим жидким гелием. Всего в коллайдере более 1200 таких магнитов. © CERN



Так выглядит тоннель Большого адронного коллайдера. Для передвижения по многокилометровому кольцу инженеры и техники, обслуживающие ускоритель, вынуждены пользоваться транспортными средствами (в том числе обычными велосипедами). © CERN

Важные достижения физики частиц последних десятилетий совершены в ходе проверки теоретических представлений об универсальности электромагнитного и слабого взаимодействий. Были открыты предсказанные ранее  $W^-$ - и  $Z$ -бозоны, детально исследованы их свойства, обнаружен  $t$ -кварк и многое другое. Эти успехи позволили в основном завершить построение Стандартной модели. Но не хватает последнего штриха в этой картине – экспериментального наблюдения бозона Хиггса.

### Сколько весит «ХИГГС»?

Как уже говорилось, поиск хиггсовского бозона – одна из главных задач экспериментов ATLAS и CMS. Что же это за частица? Почему физики так ждут ее открытия? Чтобы ответить на эти вопросы, обратимся к истокам.

Как исторически развивалась Стандартная модель? Первой релятивистской теорией взаимодействия (электромагнитного) элементарных частиц можно считать квантовую электродинамику, завершенную в конце 40-х – начале 50-х гг. прошлого века. Квантовая элект-

родинамика позволила количественно описать взаимодействие заряженных *лептонов* (электронов и мюонов) посредством обмена безмассовыми незаряженными квантами – фотонами. Предсказательная сила теории оказалась просто фантастической: скажем, магнитный момент электрона можно рассчитать с точностью более 10 значащих цифр!

Для того чтобы достичь таких успехов, теории пришлось преодолеть математические проблемы, возникающие при вычислении целого ряда фундаментальных величин. Например, если формально вычислять поправки к массе электрона, они оказываются расходящимися, т.е. бесконечными. Если предположить, что расходящиеся величины на самом деле конечны (из-за каких-то эффектов, которых мы сегодня не знаем), и заменить их величинами, известными из эксперимента (эту операцию надо проделать только с массами и зарядами), – все остальное можно вычислять со сколь угодно высокой точностью: сечения процессов, аномальные магнитные моменты и т.д. Этот подход и привел к созданию первой *перенормируемой* теории поля – квантовой электродинамики. Многие физики полагают, что свойство перенормируемости вообще

является фундаментальным свойством любой теории, которая претендует на описание природы.

Позже оказалось, что особый класс математических моделей – *теории полей Янга–Миллса* – позволяет построить перенормируемую теорию для взаимодействий, в которых безмассовые кванты поля могут излучаться не только зарядами, как в квантовой электродинамике, но и самими полями.

Как известно, фотон не заряжен. Он не может излучать фотоны – он может взаимодействовать только с источниками, так сказать, фотонного поля, т.е. электрическими зарядами. Если направить два лазерных пучка навстречу, они будут пролетать друг сквозь друга практически без всякого взаимодействия. (Свет может рассеиваться на свете только из-за взаимодействия высокого порядка – за счет рождения виртуальных электрон-позитронных пар).

Описанная ситуация характерна для электродинамики. При попытке построить теорию слабого взаимодействия выяснилось, что кванты слабого поля одновременно могут и должны излучать сами себя. Например,  $W$ -бозон может излучать  $Z$ -бозоны и наоборот. Вот тут и пригодилась теория полей Янга–Миллса. Однако проблема заключалась в том, что в теории Янга–Миллса переносчики взаимодействия – безмассовые. А из эксперимента известно, что переносчиками слабого взаимодействия являются массивные бозоны. Каким образом сделать так, чтобы частицы-переносчики имели массу, и при этом сохранить перенормируемость теории? Оказалось, что эту задачу можно решить путем введения нового фундаментального поля. Квант этого поля и есть бозон Хиггса.

До сих пор хиггсовские частицы не наблюдались. Из экспериментальных данных мы можем утверждать, что, вероятно, масса бозона Хиггса больше 115 ГэВ, а из теоретических

### КВАРКИ, ГЛЮОНЫ, АДРОНЫ И ДРУГИЕ

Согласно Стандартной модели вещество состоит из 12 фундаментальных частиц, являющихся истинно элементарными, т.е. не имеющих внутренней структуры: 6 кварков ( $d, u, s, c, b, t$ ) и 6 лептонов (электрон, мюон,  $\tau$ -лептон и соответственно 3 сорта нейтрино). Строго говоря, кварков в действительности 18, а не 6, поскольку они обладают дополнительной внутренней характеристикой – так называемым цветом, который может принимать 3 различных значения ( $6 \times 3 = 18$ ). Все эти частицы – фермионы и имеют спин (собственный момент), равный  $1/2$ .

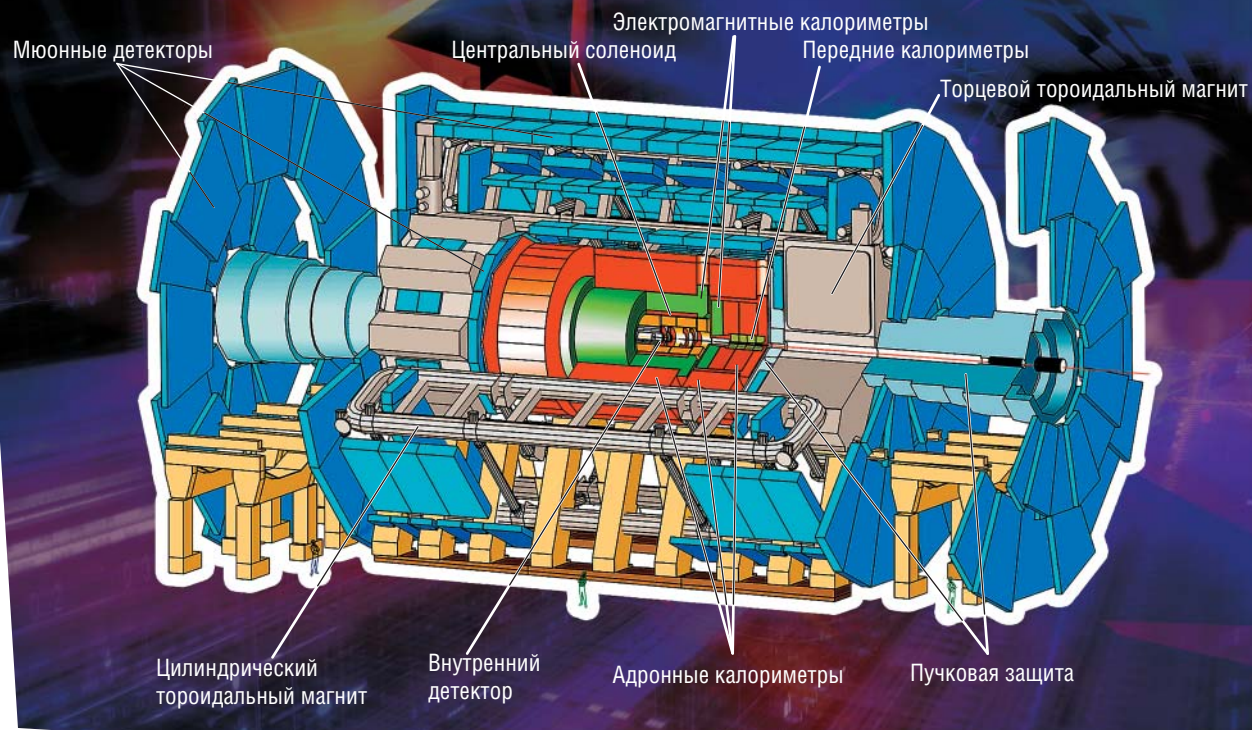
Частиц-переносчиков взаимодействия также двенадцать: 8 безмассовых глюонов – для сильного взаимодействия, 3 тяжелых калибровочных бозона ( $W^+, W^-$  и  $Z^0$ ) – для слабого взаимодействия, 1 фотон – для электромагнитного взаимодействия. Частицы из этой дюжины в отличие от фундаментальных фермионов 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. 6 сортов кварков группируются в 3 поколения: в каждом поколении один кварк имеет положительный электрический заряд  $2/3$ , а другой – отрицательный заряд  $1/3$ :

	Название кварка	Заряд	Масса
Первое поколение	d нижний (down)	-1/3	~ 5 МэВ
	u верхний (up)	+2/3	~ 3 МэВ
Второе поколение	s странный (strange)	-1/3	95 МэВ
	c очарованный (charm)	+2/3	1,3 ГэВ
Третье поколение	b прелестный (beauty)	-1/3	4,2 ГэВ
	t истинный (truth)	+2/3	174 ГэВ

соображений – что не более нескольких ТэВ. Значит, такие частицы могут и должны рождаться на Большом адронном коллайдере.

Как отличить эту частицу от других известных? У нее особые свойства. Бозон Хиггса тем сильнее взаимодействует с фундаментальными полями и частицами – калибровочными бозонами и кварками, чем больше их масса. Если, например, масса «хиггса» больше, чем удвоенная масса  $t$ -кварка (которая равна 174 ГэВ), то бозон с большой вероятностью будет распадаться на  $t$ -кварк и  $t$ -антикварк. В зависимости от того, какая конкретная масса окажется у бозона Хиггса, его свойства будут разными, но вполне определенными. И если такая частица существует в природе, мы ее обязательно найдем.



Помимо собственно коллайдера – физического устройства, сталкивающего частицы, – для проведения экспериментов необходимы приборы, которые регистрируют продукты взаимодействия этих частиц, – детекторы. Здесь представлена схема детектора ATLAS. Основная его научная задача – поиск бозона Хиггса и новых тяжелых частиц темной материи. Сложность детектора можно оценить по объему информации, который принято измерять в каналах электроники. В детекторе ATLAS около 100 млн электронных каналов! Информационной единицей является элементарный микродетектор, который сопряжен со своим усилителем, оцифровщиком, памятью. В таком качестве выступают, например, полупроводниковые и газовые трековые детекторы, которые требуются для точной реконструкции координат пролетевшей частицы. Другой важный параметр – энергия частиц – определяется с помощью калориметров различных типов. Общая длина этого гигантского детектора – 46 м, диаметр – 25 м, вес – 7000 т. Обратите внимание на человеческие фигурки, которые даны для масштаба. © CERN

### Суперсимметрична ли темная материя?

Но даже после того, как бозон Хиггса будет обнаружен, картину Стандартной модели нельзя считать полностью завершенной. Одно из актуальных ее расширений – *суперсимметрия*. Эта современная теория устраняет некоторые внутренние проблемы Стандартной модели и одновременно решает ряд других важных вопросов, в частности, объясняет присутствие *темной материи* во Вселенной.

Теория суперсимметрии предполагает наличие целого класса новых фундаментальных частиц. Каждой известной частице Стандартной модели ставится в соответствие *суперпартнер*, т.е. частица-родственник, но обладающая другой массой, другими свойствами.

Каждому фермиону соответствует бозон и каждому бозону – фермион. В эксперименте эти частицы не наблюдались, возможно потому, что не хватает энергии.

Можно себе представить, что в суперсимметричном секторе имеется легчайшая, а потому стабильная частица, которая электрически не заряжена. Она не может распасться на обычные частицы подобно тому, как протон является легчайшим *барионом* и не распадается ни на какие другие частицы, так как барионный заряд сохраняется.

Предполагается, что все суперсимметричные частицы, которые возникли в первые мгновения Большого взрыва, в конце концов распались на обычные частицы плюс легчайшие нейтральные суперсимметричные частицы. Эти частицы практически ни с чем не взаимодействуют, кроме как с гравитационным полем.

Возможно, именно из таких частиц и состоит сгустки темной материи, наблюдаемые астрофизиками.

Когда-то температура Вселенной была высока и суперсимметричные частицы находились в термодинамическом равновесии с остальным веществом. Зная *сечение рождения*, время жизни, вероятность распада, можно подсчитать, сколько с того времени должно остаться этих частиц. Точно так же, как теоретики сегодня умеют рассчитывать, какое в результате Большого взрыва должно быть количество водорода, гелия, протонов, фотонов. Таким образом, из микроскопических свойств суперсимметричных частиц, которые мы обнаружим на БАКе, можно оценить, сколько темной материи должно быть во Вселенной, если суперсимметрия является ее источником. А фактическая масса темной материи известна из астрономических наблюдений.

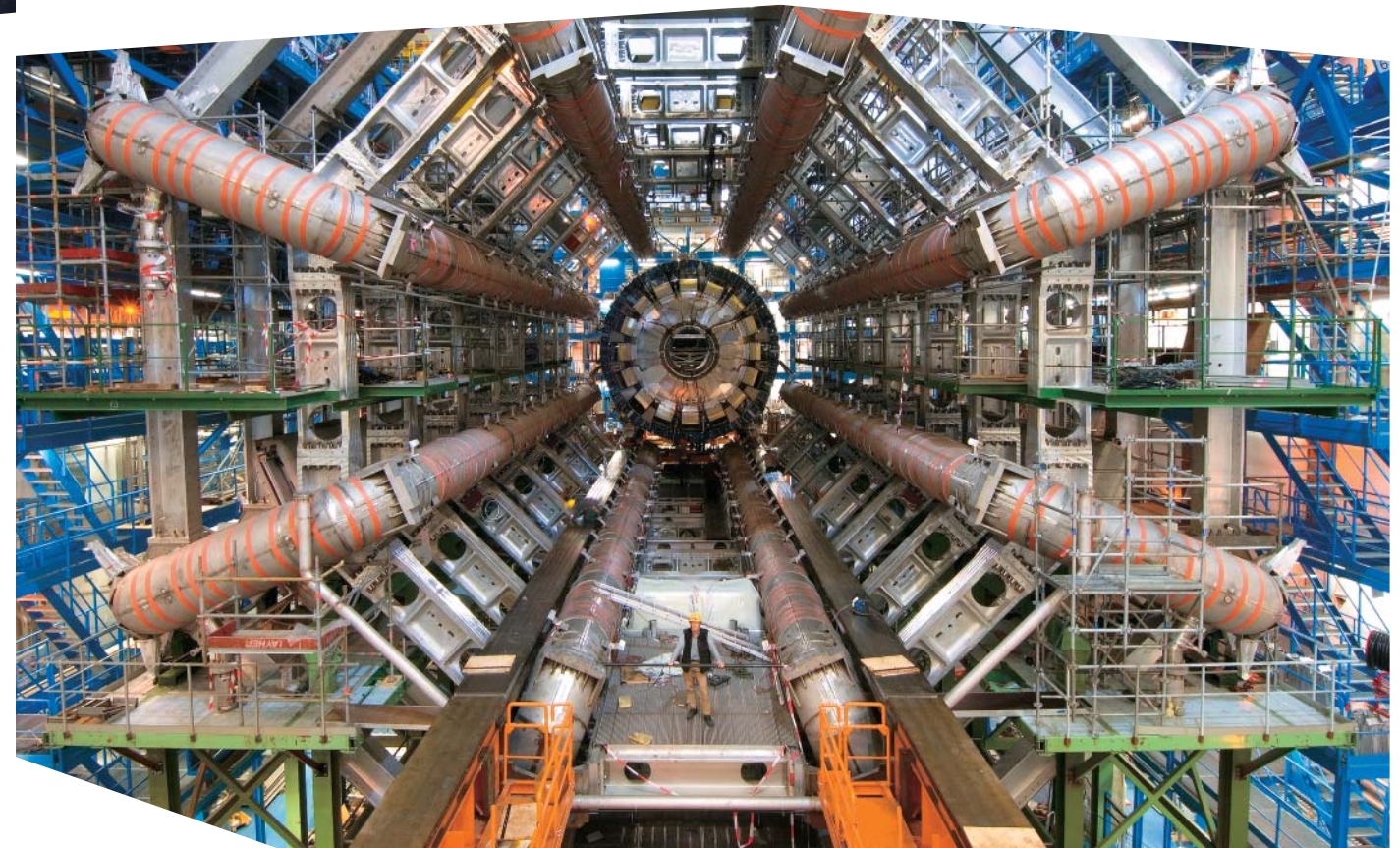
Что если суперсимметричные частицы на детекторах ATLAS и CMS не найдут? Это лишь будет означать, что целый класс моделей, которые сегодня очень популярны в силу своей внутренней красоты, в действительности

сти не реализуется. В науке нет другого пути установить истинность теории, кроме проведения критического эксперимента.

### Кварк-глюонные чудеса «Алисы»

Специфические ожидания связываются со сверхвысокой энергией ионных столкновений на детекторе ALICE. Хотя ATLAS и CMS, наверное, тоже будут работать в ионном режиме, но возможности этих детекторов не оптимизированы для исследования таких процессов. Особенность столкновений ионов в том, что они относительно редки (из-за малой плотности ионных пучков), но в каждом возникает чрезвычайно большое число вторичных частиц – несколько тысяч или даже десятков тысяч.

Что происходит, когда сталкиваются ионы? Кинетическая энергия первичных частиц (а если нуклонов в ионе около 100, то эта энергия порядка нескольких



Вид детектора ATLAS с торца в процессе сборки. Восемь расходящихся «лучей» – это сверхпроводящие катушки, создающие тороидальное магнитное поле для искривления траектории частиц и измерения их импульса. На момент снимка калориметры еще не установлены, и центральная часть установки пуста. © CERN

сотен ТэВ) переходит в температуру адронов, т.е. происходит очень быстрый нагрев ядерной материи. Предполагается, что при этом возникают условия для *фазовых превращений*. Затем сильно нагретая ядерная материя начинает разлетаться и охлаждаться, превращаясь в конечном счете в мезоны, барионы и другие частицы. Исследуя конечные продукты, можно извлечь информацию о процессах, происходивших с ядерной материей в таких экстремальных условиях.

Что это за процессы? Как известно, протоны и нейтроны состоят из кварков. Кварки удерживаются внутри нуклонов посредством взаимодействия с *глюонами*. Глюоны – переносчики сильных взаимодействий. По современным представлениям, кварки не могут существовать в свободном состоянии. Если попытаться, говоря условно, вытащить один кварк из протона или нейтрона, то нам это не удастся, потому что поля, удерживающие кварк, становятся настолько сильными, что из вакуума рождается кварк-антикварковая пара – и мы выдернем не кварк, а мезон.

Существует гипотеза, что при высокой плотности и температуре ядерной материи нуклоны как бы пла-

вятся. Выделить отдельные нейтроны и протоны уже нельзя, а сама ядерная материя выглядит как связанное состояние большого количества кварков и глюонов. Это состояние называется *кварк-глюонной плазмой*.

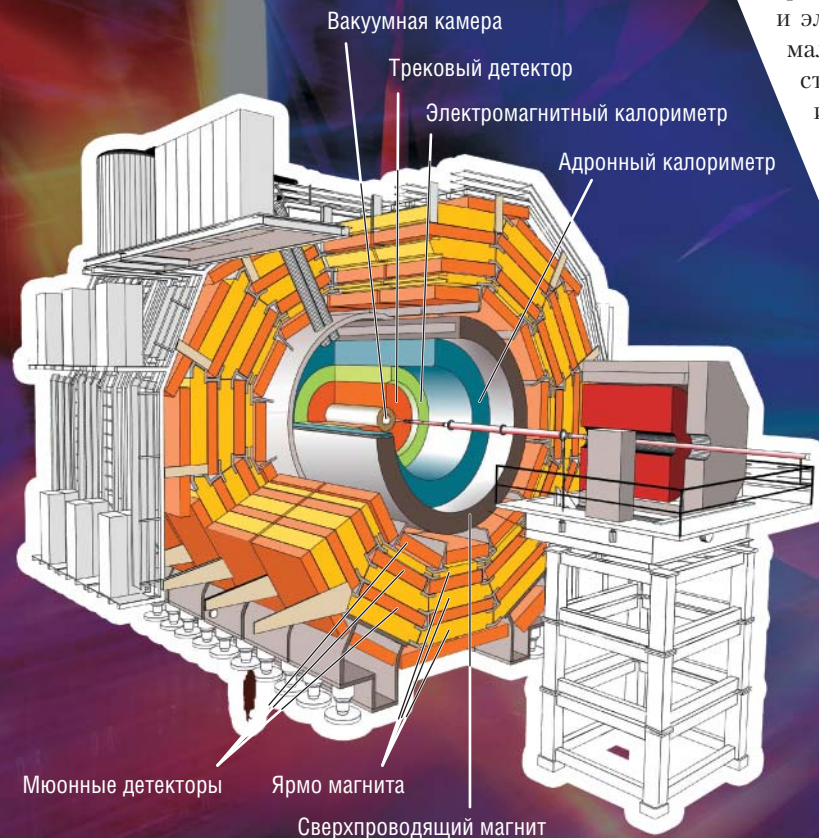
Усилия по поиску кварк-глюонной плазмы предпринимаются давно. Есть надежда, что на БАКе, а именно на детекторе ALICE, удастся получить такое экзотическое состояние вещества и исследовать его физические свойства.

### Изюминка В-мезонов

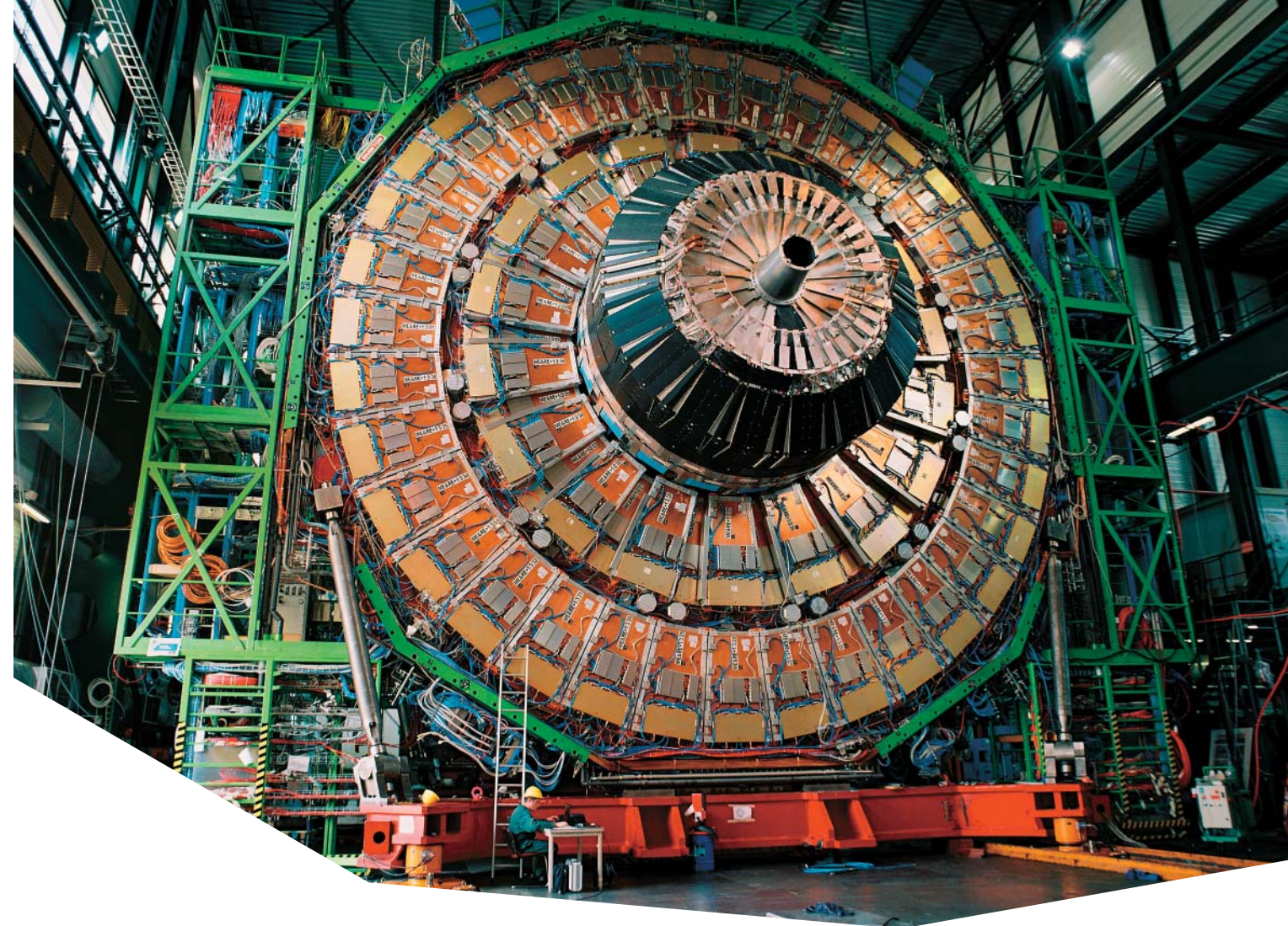
Важное место среди задач БАКа занимает физика В-мезонов. В-мезоны – это частицы, состоящие из b-кварка и легкого антикварка (u, d или s). Главная изюминка в том, что в этом мезоне присутствует b-кварк – самый тяжелый кварк с зарядом 1/3 (напомню, что шесть известных кварков сгруппированы в три поколения: в каждом поколении, как правило, более тяжелый кварк имеет положительный электрический заряд 2/3, а более легкий – отрицательный 1/3).

Чем эти мезоны интересны? Их свойства позволяют понять механизмы нарушения симметрии между веществом и антивеществом.

Вселенная асимметрична относительно вещества и антивещества. Почти вся наблюдаемая материя состоит из протонов, нейтронов и электронов, а антивещества очень мало. С другой стороны, взаимодействия частиц и античастиц, которые исследуются в экспериментах, исключительно симметричны. По состоянию на начало XXI в.



Проект CMS нацелен на решение тех же научных задач, что и ATLAS, но в этом детекторе используются несколько другие методы регистрации частиц. Обнаружение новых физических явлений будет считаться надежно установленным в случае их подтверждения обоими детекторами. © CERN



Благодаря особенно мощному и большому магниту детектор CMS – супертяжеловес в семье детекторов БАКа: его масса составляет 12500 т! А вот габариты несколько умереннее, чем у гиганта ATLAS: длина – 21 м, диаметр – 15 м. © CERN

наблюдалось единственное явление, которое в микроскопическом масштабе нарушало симметрию между частицами и античастицами, – это знаменитое *несохранение комбинированной четности* (CP-четности) в распаде долгоживущих нейтральных каонов. Каоны иногда – редко! – распадаются с нарушением CP-симметрии (CP – это последовательное применение двух преобразований: C означает замену всех зарядов на противоположные, а P – отражение в зеркале, т.е. замену векторов на противоположные).

В современной теории именно CP-преобразование переводит частицы в античастицы. И оказывается, что в Стандартной модели CP-симметрия уже нарушена. Этот факт дает основание думать, что наблюдаемая во Вселенной асимметрия не случайна. В момент возникновения мира вещества и антивещества было поровну, но в процессе эволюции, в результате взаимодействия частиц и античастиц последние исчезли, а остались практически одни частицы, из которых потом образовались звезды, галактики и мы с вами.

Чтобы понимать детали этого процесса, представляется важным подробно исследовать нарушение симметрии между частицами и античастицами. В-мезоны предоставляют такую возможность. И специализированный детектор Большого адронного коллайдера под названием LHCb как раз нацелен на то, чтобы исследовать эффект нарушения CP-симметрии в распадах В-мезонов. А в столкновениях протонных пучков на БАКе будет рождаться рекордно большое число В-мезонов.

Кстати говоря, все четыре детектора работают одновременно. Те же В-мезоны будут рождаться и на ATLAS'e, и на CMS. Но там информация о таких событиях в основном пропадет, а вот детектор LHCb оптимизирован под эти цели. С другой стороны, на LHCb трудно зарегистрировать хиггсовские бозоны, а может быть, вообще невозможно.

**ИЕРАРХИЧЕСКАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА GRID**

Для хранения и обработки экспериментальных данных, которые будут поступать с детекторов Большого адронного коллайдера, разработана специальная система GRID. Она представляет собой вычислительную среду, состоящую из большого числа компьютеров (более 20 тыс. процессорных ядер), соединенных высокоскоростными линиями связи. Эта географически распределенная инфраструктура объединяет ресурсы – процессоры, долговременную и оперативную память, хранилища и базы данных, сети, – доступ к которым пользователь сможет получить независимо от места их расположения.

С целью оптимизации потока данных система GRID разделена на несколько ярусов. Нулевой ярус, находящийся в ЦЕРНе, ответствен за сохранение первичной информации и передачу ее национальным центрам.

Первый ярус, распределенный по национальным центрам, занимается реконструкцией физических событий. Здесь из первичной информации (амплитуды сигналов, времена) извлекается физическая (углы вылета, импульсы, типы частиц).

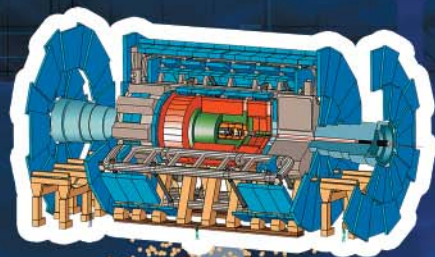
Второй ярус – компьютерные кластеры в университетах и институтах, занятых исследованием событий определенных типов для конкретных научных задач и численным моделированием эксперимента.

И наконец, третий ярус – это ресурсы рабочих групп, используемые для доступа к экспериментальным данным, визуализации и временного хранения результатов анализа.

Ярус 1 (национальные центры). В каждом центре хранится часть общих данных (~ 2000 Тб/год). Здесь выполняется реконструкция физических параметров частиц

Ярус 2 (компьютерные кластеры институтов, университетов и т.д.). С этого уровня начинается научный анализ данных

Ярус 3 (пользовательский)



Детектор регистрирует все события

~ 100 Тб/с

Фильтр отсекает неинтересные события

~ 300 Мб/с

Здесь хранятся все данные (~ 5000 Тб/год)

Ярус 0 (ЦЕРН)

~ 75 Мб/с

Франция

Германия

Италия

США

ОИЯИ

LAL

DESY

KEK

SLAC

MIT

**Всемирный поток**

Одна из особенностей Большого адронного коллайдера – качественно новый масштаб потока информации. И новый масштаб количества людей, участвующих в экспериментах.

В каждом из четырех проектов задействованы тысячи специалистов, и все они должны иметь доступ к данным. Конечно, они не могут находиться в ЦЕРНе, иначе там просто негде будет жить. Поэтому организована такая система: каждый участник, работая у себя в институте или университете, имеет доступ к информационной базе эксперимента и, более того, предоставляет свои вычислительные ресурсы всей коллаборации. Анализ и обработка данных распределены в сети из нескольких тысяч (!) компьютеров по всему миру. Любой член коллаборации, запуская программу, даже не заботится, в каком конкретно компьютере происходит процесс – система сама распределяет ресурсы. Эта система называется GRID.

Планируется, что БАК будет работать круглосуточно, примерно 10 месяцев в году; пучки будут непрерывно сталкиваться, данные – непрерывно регистрироваться. Процесс должен быть построен так, чтобы обработка данных успевала за потоком поступающей с детекторов информации. Перерывы предусмотрены только на профилактические и ремонтные работы.

Как это реально организовано? В местах встречи пучков происходит огромное количество событий – десятки миллионов в секунду! Неинтересные события сразу же отфильтровываются с помощью многоуровневой системы триггера детекторов (что позволяет уменьшить поток данных почти на 6 порядков), а потенциально заслуживающие внимания – записываются на магнитные носители для длительного хранения и последующей обработки. Эти данные определенным образом каталогизируются; каждый детектор имеет свою информационную базу.

В целях оптимизации система GRID разделена на несколько так называемых ярусов. Нулевой ярус, расположенный в ЦЕРНе, ответствен за сохранение первичной информации и передачу ее национальным центрам. Прежде чем анализировать физику явления, нужно первичную информацию – то, что непосредственно измеряет прибор (амплитуды сигналов, времена), – превратить в физические параметры (типы частиц, импульсы, энергии, углы вылета). Это делается в национальных центрах первого яруса. Собственно научный анализ начинается со следующего яруса.

Рутина экспериментальной физики частиц состоит в том, что подавляющее большинство событий – увы! – неинтересны. Для изучения отбирается чрезвычайно малая часть, которая имеет отношение к интересующей исследователя научной задаче, и складывается

в отдельный каталог. И уже потом отфильтрованная информация с разных точек зрения анализируется, чтобы получить окончательные физические результаты. Например, можно искать ранее не наблюдавшиеся частицы, определять вероятности, с которыми происходят события определенного типа, и т.д.

А затем пишется научная статья. Ее обязательно обсуждают внутри коллаборации, потому что за достоверность результатов несет ответственность весь коллектив, участвующий в эксперименте. И лишь когда все согласовано, статья направляется в журнал и становится доступной научной общественности.

Первые пучки протонов были успешно инжектированы в БАК еще в сентябре прошлого года. Однако, как часто бывает в науке, запуск новой установки на пределе технических возможностей человечества неожиданно осложнился аварией. После нескольких дней успешной работы во время испытания основных магнитов на максимальное поле произошло ЧП: в результате неконтролируемого срыва режима сверхпроводимости часть установки была повреждена.

Авария вскрыла ряд технических недочетов в конструкции магнитных элементов ускорителя. Ее причины были тщательно проанализированы и выработаны меры, которые должны предотвратить подобные происшествия в будущем. Предполагается, что к концу 2009 г. в конструкцию будут внесены все необходимые коррективы и коллайдер возобновит работу.

В заключение следует сказать, что в настоящее время проекты, подобные Большому адронному коллайдеру, конечно, не делаются исключительно ради рекордов. Чтобы сконцентрировать такие колоссальные ресурсы, требуется четкое представление перспективы: что же человек узнает нового? В этой статье я попытался показать, что такое понимание у физиков есть. Однако нужно быть готовыми к тому, что природа может преподнести и сюрпризы. И по большому счету, то неизвестное, что нас ожидает, может оказаться самым интересным.

**Литература**

Вайнштейн А.И., Захаров В.И., Шифман М.А. Хиггсовские частицы // УФН. – 1980. – Т. 131. – № 8.

Дремин И.М. Физика на Большом адронном коллайдере // УФН. – 2009. – Т. 179. – № 6.

Дремин И.М., Кайдалов А.Б. Квантовая хромодинамика и феноменология сильных взаимодействий // УФН. – 2006. – Т. 176. – № 3.