

УСТНЫЙ ВЫПУСК ЖУРНАЛА "УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК"

Физика на Большом адронном коллайдере

И.М. Дрёмин

Цели физических исследований на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider, LHC) весьма впечатляют. Четыре основных экспериментальных установки готовы к соревнованию по набору и анализу данных об адронных соударениях при очень высоких энергиях. Главные надежды связаны с получением ответов на наиболее глубокие, из всех когда-либо задаваемых, вопросы, которые касаются самых фундаментальных проблем строения вещества, действующих в нём сил и структуры пространства-времени. Кратко описаны ускоритель LHC и его четыре детектора. Приводятся основные сведения, полученные ранее на других ускорителях. Обсуждаются наиболее важные проблемы, стоящие перед исследованиями на LHC, а также последовательность подхода к их экспериментальному изучению. Кратко обозначены дальнейшие перспективы физики высоких энергий.

PACS numbers: 12.10. –g, 12.60. –i, 29.20.db

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200906c.0571

Содержание

1. Введение (571).
2. Описание Большого адронного коллайдера (571).
3. Детекторы и коллаборации (572).
4. Что мы узнали ранее (576).
5. Основные цели экспериментов на Большом адронном коллайдере (576).
6. Начальный период экспериментов на Большом адронном коллайдере (578).
7. Дальнейшие шаги (578).
8. Перспективы физики высоких энергий (579).

1. Введение

После начала работы в ЦЕРНе Большого адронного коллайдера (Large Hadron Collider, LHC) передний фронт физики высоких энергий, достигнутый когда-либо в соударениях частиц на ускорителях, будет продвинут в совершенно новую область энергий — в несколько тераэлектронвольт. Высокие энергии дают нам возможность изучать свойства пространства на всё меньших масштабах. Каждый шаг в этом направлении обычно приводил к новым фундаментальным открытиям. Вот почему результаты экспериментов на LHC ожидают с таким нетерпением.

Современная теория сил природы, носящая название Стандартной модели, обладает большими возможностями. Стандартная модель способна описывать многие

экспериментальные наблюдения и делать предсказания. Тем не менее изучаются также пути выхода за рамки этой модели. Эксперименты на LHC могут указать, какой путь выбран природой, и, более того, найти нечто непредсказанное. В основе всех подходов лежат принципы симметрии и инвариантности. К наиболее diskutированным проблемам относятся природа возникновения и разнообразие масс частиц и полей, строение физического вакуума, разнообразие типов частиц во Вселенной, единое описание фундаментальных сил, включая гравитацию, возможное существование суперсимметричных партнёров всех наблюдаемых частиц и дополнительных размерностей пространства-времени.

Здесь будет дан краткий обзор ускорителя LHC и его детекторов, основных физических открытий на более ранних ускорителях, основных целей экспериментов на LHC, их начального и последующих этапов, а также перспектив физики высоких энергий.

Ссылки на литературу об ускорителе LHC и физических исследованиях на нём не приводятся, поскольку, во-первых, число статей необыкновенно велико и, во-вторых, их легко отыскать в Интернете и физических журналах, начав, например, с популярных статей в *CERN Courier* (особенно в выпусках за сентябрь–ноябрь 2008 г.).

2. Описание Большого адронного коллайдера

Большой адронный коллайдер должен ускорять пучки протонов до полной энергии 14 ТэВ (т.е. энергия каждого из сталкивающихся протонов равна 7 ТэВ) в системе центра масс (это эквивалентно 10^{17} эВ в системе покоя одного из протонов) и пучки ионов до энергии 5,5 ТэВ на нуклон. Пучки движутся по окружности во встречных направлениях внутри тоннеля длиной 27 км на глубине от 50 м до 175 м, многократно пересекая границу между Швейцарией и Францией вблизи Женевы.

И.М. Дрёмин. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
Тел. (499) 783-37-19
E-mail: dremin@lpi.ru

Статья поступила 23 декабря 2008 г.

Движение пучков по окружности обеспечивается 1232 сверхпроводящими магнитами длиной 14,3 м и весом 3,5 т каждый, имеющими внутри два канала (для каждого из пучков, движущихся в противоположные стороны). Магнитное поле в них равно 9 Тл. Величина максимального магнитного поля определяет верхнюю границу достижимой энергии при данной геометрии. Магнитные линии в форме "∞" окружают оба канала, проходящие через центры лепестков этого знака, что позволяет обеспечить движение пучков с одинаковым электрическим зарядом по встречным траекториям. Магнитное поле создаётся электрическими токами величиной до 11,7 А, текущими по сверхпроводящим кабелям общей длиной 7600 км и весом 1200 т. Каждый кабель состоит из 36 ниток сверхпроводящей проволоки, которая, в свою очередь, содержит 6300 тонких сверхпроводящих ниобий-титановых проволоочек. Полная длина этих проволоочек примерно равна десяти расстояниям от Земли до Солнца (т.е. $10 \text{ а.е.} \approx 1,5 \times 10^9 \text{ км}$). Магниты надёжно закреплены, поскольку при полном магнитном поле на 1 м установки действует сила в 100 т.

Магниты работают при очень низких температурах (1,9 К) и давлениях (10^{-10} торр). Для работы при таких давлениях и температурах необходимо использовать жидкий гелий и обеспечивать высокий вакуум. Для начального охлаждения магнитов применяется до $1,2 \times 10^7$ л жидкого азота, а для последующего их функционирования — до 7×10^5 л жидкого гелия. Необходимо обеспечить надёжный контроль за 40000 соединений, чтобы предотвратить утечку через них. Помимо основных магнитов имеются более 500 квадрупольных сверхпроводящих магнитов и более 4000 корректирующих сверхпроводящих магнитов.

Создание ЛНС является выдающимся технологическим достижением, не имеющим аналогов. Ускоритель находится на переднем фронте и по характеристикам, необходимым для проведения экспериментальных исследований. В проекте заложена помимо высоких энергий очень высокая светимость — до $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (при работе на начальном этапе со светимостью в пять раз меньшей).

Для того чтобы понять важность этой характеристики ускорителя, рассмотрим простой пример. Обычно на практике коллайдер работает примерно 10^7 с в течение года, т.е. интегральная светимость за год составит около 10^{41} см^{-2} , или 100 фб^{-1} . Полное сечение взаимодействия сталкивающихся протонов при этих энергиях оценивается как близкое к $80 \text{ мб} = 8 \times 10^{-26} \text{ см}^2$. Таким образом, в принципе может происходить до 8×10^{15} событий в год (из них $3/4$ неупругих). В большинстве из этих событий будет рождаться несколько тысяч частиц. Ясно, что никакие электронные и компьютерные системы не в состоянии справиться с таким потоком информации, прочитать и сохранить его. Однако столь высокая светимость необходима для изучения крайне редких событий с малым поперечным сечением. Именно они принципиально важны при поисках новой физики. При хороших триггерах (т.е. при надёжном отборе событий с заранее известными признаками) можно будет получать информацию о примерно ста событиях в год в процессе с очень низким сечением 1 фб. Поэтому детекторы должны обладать очень хорошей триггерной системой, которая могла бы отобрать среди рождающихся с высокой плотностью новых частиц только те, которые представляют интерес в данный момент, и

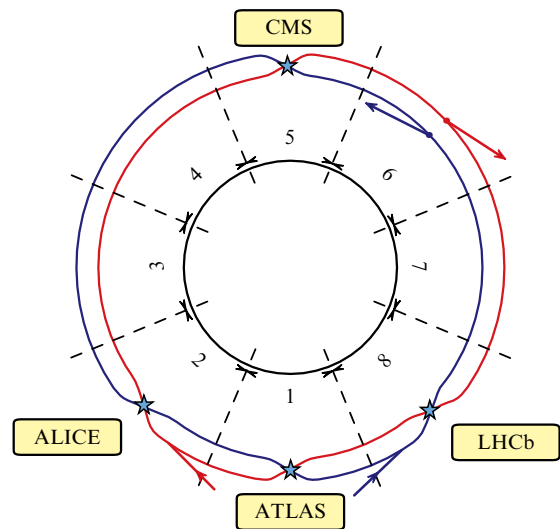


Рис. 1. Общая схема ускорителя ЛНС. Направления движения пучков показаны стрелками. Звёздочками изображены четыре точки их столкновения, в которых располагаются четыре основных детектора.

отбросила бы все остальные. Итак, высокая светимость ускорителя необходима для изучения процессов с малыми поперечными сечениями. Для исследований процессов с большими сечениями достаточно работать в режиме с более низкой светимостью. Этого можно достичь разными способами (например, дефокусировкой пучков, как при работе с детектором LHCb (Large Hadron Collider Beauty Experiment)).

Схема ускорителя ЛНС приведена на рис. 1. Ясно видна структура с двумя направлениями (указанными стрелками) движения пучков навстречу друг другу. Имеется четыре точки, в которых эти пучки пересекаются и происходят встречные столкновения протонов. Там помещаются четыре основных детектора.

3. Детекторы и коллаборации

Четыре основных детектора ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), ALICE (A Large Ion Collider Experiment) и LHCb должны регистрировать продукты, рождающиеся в четырёх точках взаимодействия пучков. Соответственно созданы четыре одноимённые международные коллаборации физиков, работающих с этими детекторами. Число участников в крупнейшей из них, ATLAS, уже перевалило за 2000. Эти детекторы и коллаборации являются одновременно соперниками и союзниками в поисках новых физических явлений. Время рассудит, какой выбор был лучшим.

Самые большие детекторы, ATLAS и CMS (рис. 2 и 3), предназначены для изучения событий соударения как протонов с протонами, так и ионов с ионами. Детектор ALICE нацелен в основном на исследование ион-ионных соударений, хотя на нём будут получены некоторые данные и для протон-протонных процессов. LHCb предназначен для регистрации событий с рождением b -кварков и потому обладает специфической структурой. Помимо четырёх основных детекторов имеются также субдетекторы меньших размеров: LHCf (LHC forward), Totem, ZDC (Zero Degree Calorimeter), FMS (Forward muon spectrometer), Castor и FP420 (причём FP420

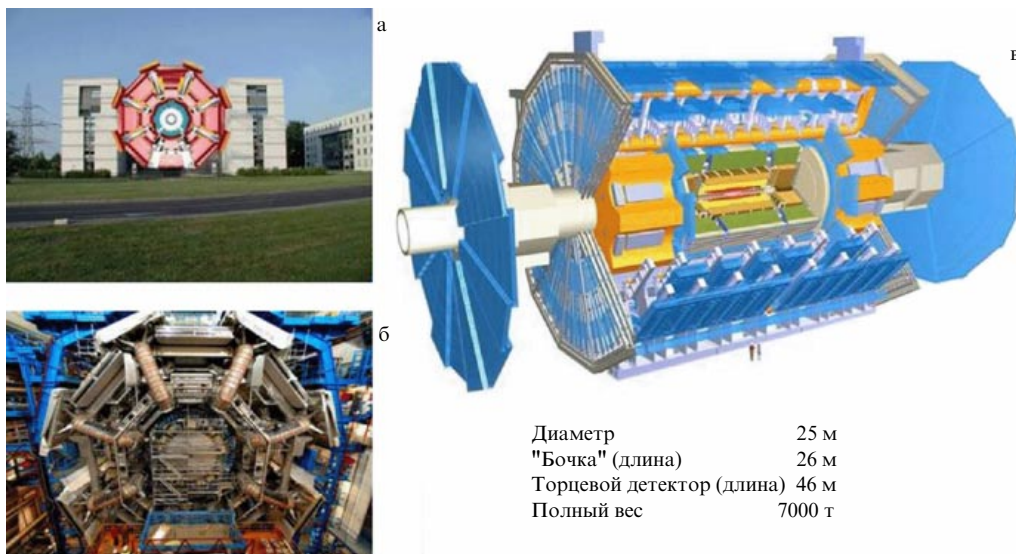


Рис. 2. Детектор ATLAS: (а) изображение детектора в натуральную величину, наложенное на здание 40 в ЦЕРНе, где расположены коллаборации ATLAS и CMS, (б) общий вид, (в) схема в разрезе.

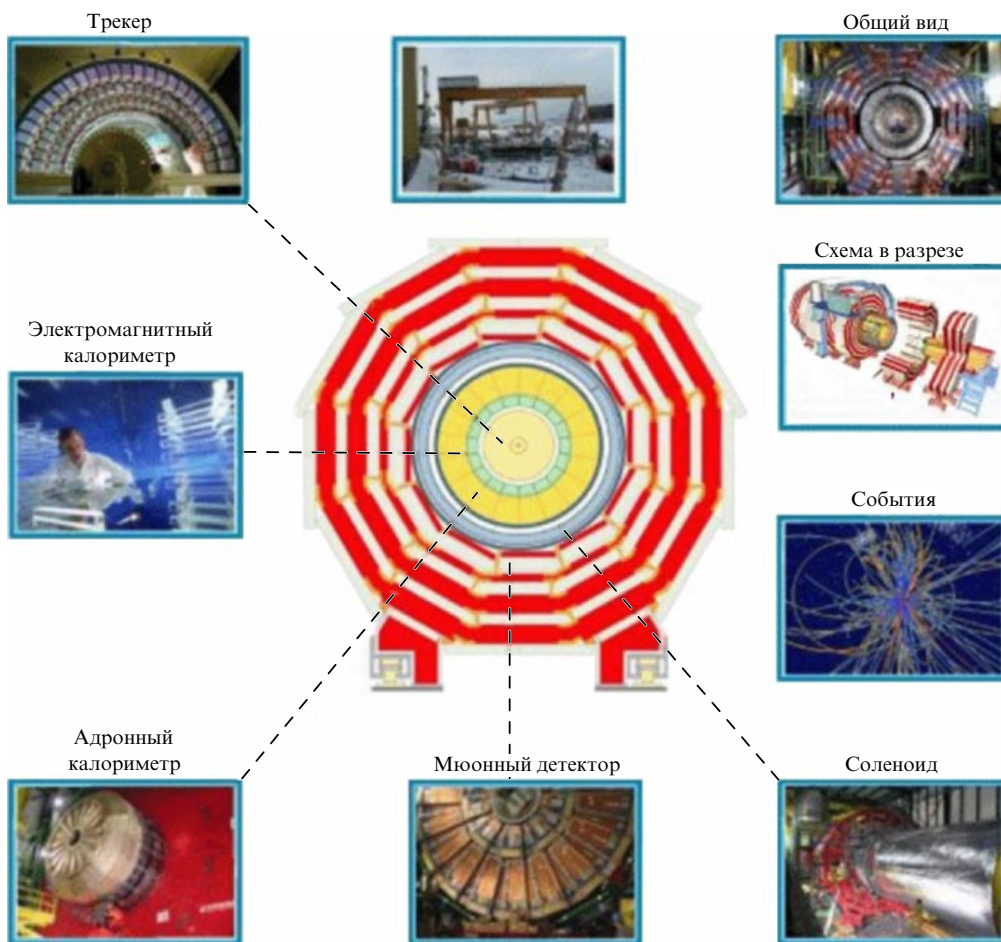


Рис. 3. Детектор CMS: схема в разрезе и внутренняя структура с указанием разных трекеров и калориметров.

(аббревиатура FP — от англ. forward proton) ещё ожидает одобрения проекта). Субдетекторы предназначены для работы в комбинациях с некоторыми из основных детекторов и нацелены на регистрацию частиц, испущенных под малыми углами. Поэтому они располагаются на

больших расстояниях, вплоть до нескольких сотен метров (420 м для FP420), от главных детекторов.

Размеры основных детекторов поистине впечатляющие. Высота ATLAS равна 25 м (что примерно равно высоте 8-этажного дома), его длина 46 м и вес 7000 т.

Такие размеры нужны, чтобы вместить все трекары и калориметры, перекрыв ими как можно большую область углов, в которой будут регистрироваться рождённые частицы. При равномерном покрытии азимутальных углов предпринимается попытка детектировать частицы, рождающиеся с полярными углами θ в несколько долей градуса по отношению к направлению пучков. В терминах псевдобыстроты $\eta = -\log(\tan \theta/2)$ это означает, что будет доступна область вплоть до $\eta = 5$. Однако разные элементы детекторов перекрывают несколько различные области псевдобыстроты. Поэтому те или иные физические измерения можно будет проводить с разной степенью точности. Субдетекторы расширяют доступную область в сторону малых углов настолько, что удастся работать и с псевдобыстротами, близкими к 9, т.е. с углами в несколько сотен долей градуса. Естественно, важно, чтобы частицы, летящие под столь малыми углами, не были захвачены опять потоком частиц внутри трубы ускорителя, что потребовало специальных решений этой проблемы.

Детекторы, которые имеют цилиндрическую форму ("бочка"), окружают области взаимодействий однородными магнитными полями. Сегментация детекторов должна быть достаточно мелкой, для того чтобы не допустить перекрытия сигналов от разных источников. Ни одна заряженная частица не должна быть упущена. Многие частицы продолжают двигаться почти по направлению пучка. Торцовые крышки (end-caps) основных детекторов и "передние" субдетекторы в значительной степени покрывают эту область углов. Имеется несколько триггерных уровней, в которых задействованы все элементы детекторов.

Структура пучков имеет отличительные черты. Поток протонов в кольце ускорителя не является равномерным, а состоит из сгустков (пучков), следующих один за другим с временными интервалами 25 нс, или на расстоянии около 7,5 м друг от друга, много меньшем длин детекторов. При таком следовании пучков частота их встреч в точках взаимодействия будет составлять величину около 40 МГц, которая реально будет меньше — примерно 30 МГц. Большинство протонов пучка пролетят, не взаимодействуя в этих точках, и продолжат движение вдоль кольца ускорителя. Но даже в этом случае при каждой встрече пучков одновременно будет происходить около 20–40 актов взаимодействий двух протонов на очень малой длине вдоль их траектории внутри детекторов. Триггерная система должна различать взаимодействия и, более того, отбирать те из них, которые представляют физический интерес. Ограничения, налагаемые электроникой и компьютерами, допускают оставлять 100–200 событий в секунду, которые можно будет записать и сохранить. Поэтому триггеры должны быть быстродействующими, специализированными, подходящими для целей соответствующего детектора, допускающими перепрограммирование в случае изменения физических требований и устойчивыми к сильному облучению очень интенсивным потоком заряженных частиц.

Магнитные поля в детекторах необходимы для искривления траекторий рождаемых заряженных частиц. Магнитные поля достигают 2 Тл в ATLAS и до 4 Тл в CMS. Кривизна траектории позволяет измерить импульс частицы и определить её природу (массу). Это — основная информация, которую получают о том или

ином процессе. Детектирование частиц основано на свойствах взаимодействия заряженных частиц с веществом детектора. Общая "архитектура" детекторов ATLAS, CMS и ALICE имеет много общего, тогда как LHCb в основном ориентирован на то, чтобы уделять особое внимание b-кваркам, движущимся преимущественно в переднем направлении. Центральная область, ближайшая к точке взаимодействия, заполнена системой трекаров, следящей за траекторией частицы и измеряющей её импульс. Затем следуют электромагнитные калориметры, в которых происходит поглощение фотонов и электронов с измерением их полной энергии. Покосильные адроны поглощаются на больших длинах, адронные калориметры размещаются на ещё большем расстоянии от точки взаимодействия. Мюоны являются наиболее проникающими частицами, и потому системы для их детектирования находятся на периферии детекторов.

Во внутренних частях детекторов используются кремниевые пиксельные детекторы, покрывающие площади до 2 м² на весьма малых радиусах от центральной оси детектора, вплоть до 4,5 см, а также кремниевые микрополосчатые детекторы на больших радиусах (20–55 см). Кремниевые детекторы хорошо сегментированы, для того чтобы обеспечить аккуратное слежение за траекторией частицы и получить достаточно точность определения координат треков. Кроме того, в ATLAS используется трекарь переходного излучения (TRT), действие которого основано на эффекте переходного излучения фотонов заряженными частицами. Радиус TRT больше 56 см. Он позволяет также отличить электроны от пионов. Число точек вдоль следа частицы в TRT велико (около 30–40 на трек). В совокупности эта система обеспечивает непрерывное слежение за следом частицы, её идентификацию, точное измерение импульса, а также реконструкцию первичных и вторичных вершин взаимодействий. Особенно пристальное внимание уделено сопротивляемости используемых материалов радиации, которая исключительно сильна из-за огромных потоков на столь малых расстояниях от точек взаимодействия. Это требование весьма важно и для электронных систем, считывающих информацию с компонентов детектора и передающих её в компьютерную сеть.

Далее следуют калориметры, которые поглощают и измеряют потоки энергии электронов, фотонов и адронов, а также служат в качестве триггеров сигналов, в частности, от событий, подозреваемых на проявления новой физики. Электромагнитный калориметр детектора ATLAS состоит из слоев свинца, между которыми находятся области, заполненные жидким аргонном. В CMS для этих целей используются кристаллы с очень высокой плотностью. С их помощью измеряются направления распространения и энергии электромагнитных ливней, развивающихся в плотном веществе. Адронные калориметры, расположенные вокруг электромагнитных калориметров, тоже измеряют направления и энергии адронных ливней (особенно струй адронов), а также недостающую энергию, которая может быть связана, например, с нейтрино, недетектированными нейтральными частицами и т.д. Самые дальние от точек взаимодействия периферийные части детекторов состоят из использующих газы устройств, предназначенных для идентификации мюонов и измерения их импульсов. Работа этих устройств полностью синхронизована с

работой остальных частей детекторов. Надо заметить, что некоторые системы обеспечивают независимое измерение импульсов, что позволяет проводить взаимную проверку.

Работа с такими сложными системами требует высокой квалификации физиков, которые должны знать и калибровать разные части детекторов. Конечно, в каждом из детекторов проявляются и специфичные только для него проблемы. Например, в детекторе LHCb особенно высокие требования предъявляются к точности определения положений вершин распадов, от которой зависит точность получаемых данных о B -мезонах. Подобные ситуации типичны и для других детекторов. Но, несомненно, общим для всех детекторов является необходимость их калибровки с помощью космических лучей для понимания их отклика на прохождение частиц на начальном этапе, что уже активно проводится.

Необходимо задействовать огромные вычислительные ресурсы для того, чтобы отобрать, сохранить, распределить и проанализировать всю информацию, которая будет поступать с ускорителя (несколько десятков петабайт в год). С этой целью развивается специальный проект (Grid), объединяющий компьютерные центры во всём мире. Он подразделён на несколько уровней ("Tiers" 0, 1, 2), на которых собирают необработанные данные, обрабатывают и реконструируют события (0), распределяют их по экспериментальным группам для физического анализа (1) в соответствии с триггерными условиями, а затем предоставляют для сопоставления с результатами розыгрыша с помощью программ на основе метода Монте-Карло и дальнейшего анализа (2).

Всё это показывает, насколько сложными оказались проблемы, возникшие перед инженерами и физиками ещё до начала работы ускорителя. Это стало особенно ясным в сентябре 2008 г. Первая попытка запуска ускорителя, предпринятая 10 сентября 2008 г., оказалась очень успешной. Были зарегистрированы первые события взаимодействий протонов. Одно из них, зафиксированное в детекторе CMS, показано на рис. 4. Были даже получены предварительные результаты по распределениям частиц при несколько меньшей энергии. На специалистов большее впечатление произвела прекрасная форма пучков. Устойчивый продольный профиль пучка продемонстрировал, что пучки синхронны по времени с системой, которая ответственна за ускоряющие электрические

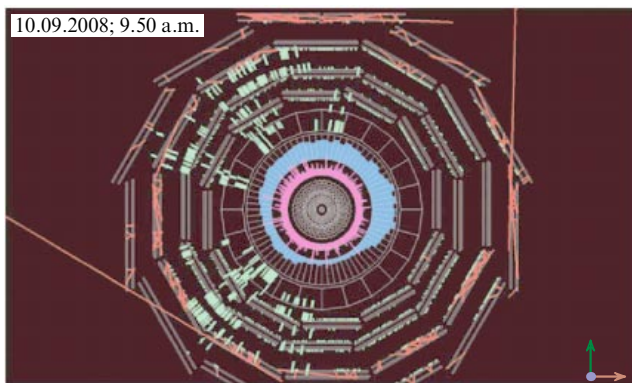


Рис. 4. Первые события соударения пучков, зарегистрированные на LHC в детекторе CMS. Видны треки частиц в трекерах и калориметрах.

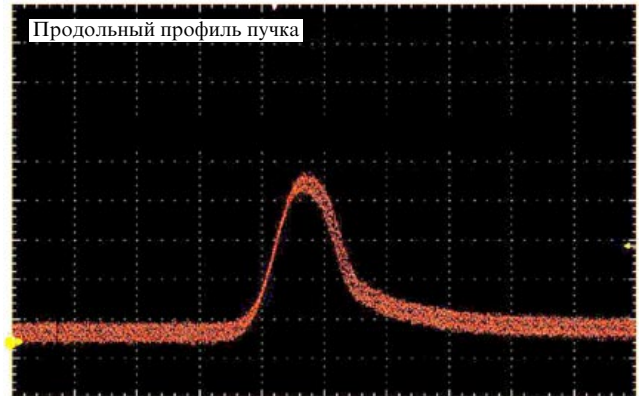


Рис. 5. Идеальный продольный профиль пучка демонстрирует устойчивость работы и хорошую синхронизацию всей ускорительной системы LHC.

поля (рис. 5). Таким образом была показана возможность оперировать с ускорителем при энергиях и светимостях несколько меньших, чем их номинальные значения.

Однако последующая попытка увеличения энергий и светимости, предпринятая 19 сентября 2008 г., оказалась неудачной. Произошёл выброс жидкого гелия в тоннель ускорителя. Согласно журналу *CERN Courier* "предварительные исследования показывают, что наиболее вероятной причиной проблемы является разрушение соединения между двумя магнитами, которое, возможно, расплавилось при сильных токах, что привело к разрушению камеры с гелием и выходу газа под высоким давлением в криостат. Затем газ был выпущен в тоннель через аварийные клапаны, специально предназначенные для таких целей". Представляется практически невероятным, чтобы на начальном этапе вообще не возникло никаких проблем, поскольку "LHC построен на пределе технологических решений с беспрецедентной сложностью".

Повторный запуск ускорителя планируется в середине 2009 г., после того, как обогреют тоннель и всё в нём восстановят. Конечно, начальные значения энергии и светимости будут ниже запланированных. Однако физики-прагматики не очень разочарованы. Согласно мнению лидера коллаборации ATLAS П. Йенни, "это уже даст нам множество сведений для калибровки и понимания всех частей детектора, а также для подготовки к получению данных и их анализу. Перед тем, как заявлять о каком-либо открытии, мы должны прежде всего показать, что удаётся воспроизвести обычную физику и что детекторы работают нормально". "Инаугурация" LHC состоялась в ЦЕРНе 21 октября 2008 г.

В работе над проектом LHC принимают участие физики из 20 стран, входящих в ЦЕРН, и пяти стран (включая Россию), имеющих статус наблюдателей. Российские институты участвуют в работах на всех этапах: разработка проекта и сооружение ускорителя и детекторов, создание линии, соединяющей LHC с ускорителем SPS (Super Proton Synchrotron), поставка материалов и оборудования, радиационные исследования, создание программ управления детекторами, сбор данных и их обработка, разработка программ физических исследований, а также принимают участие во всех экспериментальных коллаборациях и в обсуждении теоретических предсказаний.

4. Что мы узнали ранее

Прежде, чем начать рассмотрение программы научных исследований на ЛНС, обсудим кратко результаты, полученные на ранее построенных ускорителях.

Ускоритель SPS в ЦЕРНе сейчас используется как инжектор частиц с энергией 450 ГэВ в ЛНС. В качестве основных результатов, полученных на SPS в предыдущие годы, следует отметить точные измерения общих характеристик адронных взаимодействий при энергиях до 540 ГэВ (полные поперечные сечения, вещественные части амплитуд упругого рассеяния вперёд, дифракционные процессы, инклюзивные распределения, корреляции и т.п.), а также получение первых указаний на коллективные эффекты в соударениях ионов, которые привели к возникновению понятия о кварк-глюонной плазме (КГП). В наши дни SPS также служит как источник нейтринных потоков, направляемых в лабораторию в Гран Сассо в Италии, но на нём проводятся в ЦЕРНе и эксперименты на фиксированных мишенях (например, измерения дилептонных спектров и т.п.).

Упомянем здесь, что для ЛНС используется тоннель, изначально построенный для Большого электрон-позитронного (LEP) коллайдера, в котором происходили взаимодействия встречных пучков электронов и позитронов с полной энергией до 200 ГэВ. Ускоритель LEP был весьма успешным проектом. На нём впервые были найдены и подробно изучены кварковые и глюонные струи, точно измерена константа связи КХД α_s и её зависимость от энергии (с имеющейся сейчас точностью $\alpha_s(M_Z) = 0,1176 \pm 0,002$), были открыты и исследованы носители слабых взаимодействий — W- и Z-бозоны, установлен нижний предел массы бозона Хиггса (114 ГэВ), не говоря уже о многих других достижениях. Сейчас LEP не функционирует и его место занято ЛНС.

Другой, недавно прекративший работу, ускоритель HERA (Hadron-Electron Ring Accelerator) в Гамбурге разгонял и сталкивал пучки электронов с энергией до 27,5 ГэВ и протонов с энергией до 920 ГэВ. Это позволило физикам подробно изучить так называемые структурные функции протонов, т.е. разобраться с кварк-глюонным составом протонов высоких энергий. Наиболее важные результаты связаны с возрастанием числа мягких глюонов в протонном "облаке" и энергетической зависимостью структурных функций (свойство скейлинга и отклонения от него).

Наиболее близким к ЛНС по энергии и природе сталкивающихся объектов является Тэватрон (Tevatron) в лаборатории им. Ферми вблизи Чикаго. В Тэватроне сталкиваются протоны с антипротонами с энергией почти 2 ТэВ в системе центра масс. Каждая из этих частиц представляет собой пучок кварков, антикварков и глюонов, распределённых внутри её в соответствии со структурными функциями. Поэтому соударения частиц являются источниками сведений о $q\bar{q}$ -, gg -, $\gamma\gamma$ - и γ -померон-процессах. Весьма интенсивными и успешными были также исследования масс и ширин W- и Z-бозонов, а также топ-кварков (приблизительные значения их масс равны соответственно 80,4, 91,2 и 172 ГэВ). Был определён и нижний предел массы хиггс-бозона. Подробно исследовались квантово-хромодинамические (КХД) струи и процессы с большими поперечными импульсами. Но и сейчас с Тэватрона продолжают поступать сведения, которые вызывают огром-

ный интерес (упомянем, например, о многомюонных событиях (?), обнаруженных недавно). Все эти процессы будут изучены на ЛНС с ещё большей точностью. Статистика подобных событий (например, струй с такой же энергией) на ЛНС будет примерно в тысячу раз большей, чем на Тэватроне, при том же времени набора.

Другой ускоритель, RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider), действует в Брукхейвене. Основная цель работ на RHIC состоит в изучении столкновений встречных пучков ионов при их полной энергии до 200 ГэВ на нуклон и в сопоставлении результатов с аналогичными данными о соударениях протонов. Удалось подробно изучить свойства ядерного вещества, образующегося при таких столкновениях, что дало дополнительную поддержку идеям об образовании кварк-глюонной плазмы. Оказалось, что эти свойства ближе к свойствам идеальной жидкости, чем к свойствам газов, как предполагалось вначале (в частности, значения ядерного показателя преломления оказались близкими к 2–3 согласно интерпретации в терминах черенковских глюонов). Чётко наблюдались и другие коллективные эффекты — азимутальная асимметрия потоков частиц и смягчение спектров частиц в струях при прохождении через эту среду. Впечатляет и успех работ на RHIC с поляризованными пучками.

Несколько отличным является подход, выбранный на V-фабриках в КЕК (Япония) и SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) (США). Большие интенсивности пучков позволили провести аккуратные измерения свойств семейства Υ -бозона, а также других процессов с рождением b-кварков. Это привело к более ясному пониманию как проблемы нарушения CP-инвариантности и определению элементов матрицы Кабиббо–Кобаяши–Маскавы (СКМ-матрицы), так и возникновения различий между веществом и антивеществом, а также позволило более детально исследовать редкие распады частиц и получить ограничения на массы суперсимметричных партнёров известных нам частиц.

В одной статье невозможно подробно рассказать о всех достижениях экспериментальных исследований на этих ускорителях, не говоря уже о поистине революционных теоретических, связанных с этими исследованиями, идеях, которые часто определяли их направленность. Однако главные проблемы и указания для экспериментирования на ЛНС проясняются уже на основе вышесказанного.

5. Основные цели экспериментов на Большом адронном коллайдере

Как было и ранее, основными задачами экспериментов на ЛНС будут поиски ранее неизвестных, ненаблюдавшихся явлений. Некоторые указания на такие явления следуют из теоретических работ.

Основное внимание сейчас уделяется поискам так называемого бозона Хиггса. Его наличие связывают с идеей о природе масс частиц и их разнообразии. В теории проявление массы приписывается обменам бозоном Хиггса. Пока мы не понимаем, почему массы большинства "элементарных" составляющих вещества столь сильно различаются. В частности, масса топ-кварка больше масс нейтрино в 10^{14} раз (!), не говоря уже о нулевой массе фотона.

Направления поисков бозона Хиггса определяются различными механизмами рождения и мод распада этой частицы. Наиболее вероятный интервал масс бозона Хиггса оценивается современной теорией как равный 120 ± 6 ГэВ. Субдетекторы на малые углы позволяют изучать эксклюзивные процессы рождения бозона Хиггса с такой массой в центральной области с выделением двух конечных протонов при большой величине интервала псевдобыстрот между ними. "Золотая" мода распада на два Z -бозона, каждый из которых, в свою очередь, распадается на два мюона, проявится при массах более 200 ГэВ. Именно такой величиной массы изначально определялись конструкции детекторов ATLAS и CMS и их пропорции. ATLAS длиннее CMS, но он обладает менее сильным магнитным полем. Это предопределено требованием измерять импульсы мюонов с точностью не менее 10 %, а относительная ошибка в измерении импульсов обратно пропорциональна величине магнитного поля и квадрату длины трека внутри детектора. Если же окажется, что масса бозона Хиггса находится где-то в области 1 ТэВ, то надо будет изучать его каналы распада с рождением W -, Z -бозона и струй в разных комбинациях. Конечно, увеличение числа каналов распада приводит к заметному возрастанию ширины распада бозона Хиггса. Необходимо также регистрировать фотоны, b -кварки, тау-лептоны, для того чтобы получить убедительные доказательства наблюдения бозона Хиггса. Но мы ещё даже не знаем, существует ли только один бозон Хиггса или их несколько, обладают ли они внутренней структурой и при общем возрастании ширины распада не перекроются ли они по массам так, что почти сольются с фоновыми событиями.

Другое важное направление связано с поисками суперсимметричных партнёров уже известных частиц (счастии). Счастии предсказываются теоретически как следствие возможной суперсимметрии нашего мира. Однако ввиду нарушения этой суперсимметрии такие частицы должны быть очень тяжёлыми, и потому они до сих пор не обнаружены. Их проявление в эксперименте будет определяться тем, насколько они тяжелы. Поперечные сечения для процессов, выходящих за рамки Стандартной модели, оцениваются как лежащие в интервале от нескольких фемтобарн до нескольких пикобарн.

Вообще говоря, надо искать и новые массивные резонансы.

В экспериментальную программу ЛHC включено изучение и "старых" КХД-эффектов, таких как инклюзивные распределения, рождение W -мезонов или мезонов, содержащих как боттом, так и странный кварк, дилептонные спектры, коллективные эффекты в соударениях ионов с ионами и т.п. ЛHC можно назвать фабрикой тяжёлых кварков, потому что поперечные сечения для рождения пар $b\bar{b}$ будут составлять порядка 1 мкб, а для рождения топ-кварков — порядка 1 нб. Субдетекторы, нацеленные на малые углы, помогут в решении некоторых проблем физики космических лучей, например, путём калибровки моделей взаимодействия адронов, используемых в программах, предназначенных для описания космических ливней супервысоких энергий.

Конечно, все мы с особенным нетерпением ожидаем, что будет найдено нечто совершенно новое и неожиданное, как это часто случалось ранее, когда удавалось проникнуть в неизведанную область энергий.

С теоретической точки зрения, одна из наиболее загадочных проблем кроется в структуре физического вакуума. Считается, что нарушенные симметрии играют важнейшую роль в нашем мире. Идеи, широко используемые в сверхпроводимости (вспомним о потенциале Гинзбурга – Ландау!), в ферромагнетизме и многих других разделах физики твёрдого тела, лежат также в основе понятий физики частиц о бозоне Хиггса, суперсимметрии, CP-нарушении и т.п. Сложная структура физического вакуума с многими минимумами (подобная форме некогда распространённой стиральной доски!) и специальные асимметрии определяют многие эффекты. Эта структура до сих пор не до конца понята. Полагают, что физический вакуум отнюдь не пуст, а наполнен скалярными полями Хиггса.

В рамках Стандартной модели есть много необъяснённых явлений. В частности, пока нет ответа на вопросы: почему имеется ровно три поколения кварков и лептонов или что лежит в основе иерархии масс и где происходит объединение всех взаимодействий?

Обнаружение распадов бозона Хиггса на ЛHC означало бы, что мы находимся на верном пути к разгадке проблемы иерархии масс. В то же время это приведёт к появлению многих новых вопросов о том, существует ли только один бозон Хиггса (сейчас эта возможность многим кажется весьма нереалистичной и разочарывающей) или существуют и другие бозоны Хиггса либо у этой частицы имеется внутренняя структура. Необходимо будет проверить пропорциональность силы связи бозона с другими частицами массе этих частиц путём изучения разных мод распадов. Поля Хиггса тесно связаны с такими астрофизическими наблюдениями, как тёмная энергия (или, на языке теоретиков, с космологической постоянной в теории гравитации).

Фундаментальная суперсимметрия может проявить себя на ЛHC при обнаружении легчайших счастлих, например, таких как нейтралино или гравитино. Суперсимметрия подбирает пары наблюдаемых фермионам и бозонам так, что каждой частице-фермиону соответствует свой суперсимметричный партнёр-бозон, и наоборот. Радиационные поправки в суперсимметричных теориях сокращаются в результате такого спаривания. В Стандартной модели такого спаривания не существует. Это — выход за её рамки, который требует существования суперчастии. Тогда возникает абсолютно новый мир. Если его удастся обнаружить, то в нашем распоряжении окажется естественный кандидат для объяснения тёмной материи и откроется возможность объединения всех фундаментальных сил природы.

Другой путь вне рамок Стандартной модели открывается идеей о дополнительных размерностях пространства-времени. Эти дополнительные размерности могут быть свёрнуты (компактифицированы) так, что их до сих пор не удавалось наблюдать, но, может быть, удастся заметить при энергиях, превышающих 1 ТэВ. Такое случается в некоторых вариантах модели струн. При этом, в частности, гравитация может стать сильной и при энергиях ЛHC смогут рождаться чёрные мини-дыры. Новый мир частиц Калуцы – Клайна¹ может проявить себя.

¹ Теоретики Калуца и Клайн впервые опубликовали статью, в которой была высказана идея о дополнительных размерностях, в 1920-х годах.

Что касается CP-нарушения, мы уверены, что наше описание в терминах 3×3 -матрицы СКМ в основном правильно. Однако необходимо понять, почему именно три поколения кварков и лептонов избраны природой. Нужно точнее измерить значения углов в унитарном треугольнике. Видимо, должны существовать дополнительные источники нарушения CP-симметрии, наличие которых позволило бы объяснить космологическую проблему асимметрии вещества и антивещества. Ими могут оказаться ещё не обнаруженные тяжёлые частицы. Данные измерений редких распадов В-мезонов в детекторах ATLAS, CMS, LHCb должны помочь в решении этой проблемы. Для ATLAS и CMS это как раз тот эксперимент, в котором потребуются высокая светимость LHC. В детекторе LHCb, наоборот, светимость будет даже несколько понижена с помощью дефокусировки пучков в точке столкновения. Если новые частицы окажутся очень тяжёлыми, то может случиться так, что их прямое рождение не удастся наблюдать на ATLAS и CMS, но их виртуальные состояния проявят себя и смогут быть обнаружены на LHCb.

Новые свойства адронного вещества могут проявиться и в новой области плотностей и температур, которая станет доступной для исследования в соударениях ионов с ионами при энергиях LHC. Скачок в значениях плотности энергии, достигаемых на LHC, действительно огромен (она в 28 раз выше, чем на RHIC, и в 300 раз выше, чем на SPS). Это исключительно важно для понимания поведения вещества при таких условиях, и, следовательно, для понимания процессов, протекавших в ранней Вселенной, когда кварки и глюоны не удерживались внутри адронов, а были "свободными". Изменение характера коллективных эффектов с возрастанием энергии (по сравнению с характером таковых на RHIC) может указать на природу перехода от адронов внутри ядер к кварк-глюонному веществу в тот краткий промежуток времени, когда ядра перекрываются перед дальнейшей адронизацией. Помимо поисков горячей и плотной кварк-глюонной плазмы перспективными являются поиски холодного и плотного конденсата цветного стекла (CGC), в котором могут проявить себя новые свойства полей, описываемых квантовой хромодинамикой.

В исследованиях на LHC проблемы очень малых и очень больших расстояний связаны между собой. Понимание фундаментальных сил и их объединения при очень высоких энергиях и малых расстояниях оказывается кардинально важным для теорий поведения Вселенной как на начальном этапе её зарождения и развития, так и в настоящее время. В связи с экспериментами на LHC активно обсуждаются и такие понятия, как тёмная материя, тёмная энергия и чёрные дыры, и связанные с ними проблемы.

6. Начальный период экспериментов на Большом адронном коллайдере

После инцидента с выбросом гелия расписание работы LHC, естественно, было изменено. Новые попытки запустить ускоритель с пучками протонов, имеющими проектную энергию, но с пониженной светимостью намечены на середину 2009 г. В случае успеха эксперименты начнутся вскоре после этого. Некоторое время понадобится на проверку всех систем детекторов с целью откалибровать их и понять их работу. При меньших

интенсивностях работа детекторов уже проверялась с помощью космических лучей. Реакция детекторов на физические сигналы при высоких интенсивностях будет сначала проверена на эффектах, которые хорошо известны в обычных (minimum-bias) событиях с частицами, имеющими относительно малый импульс в конечном состоянии, и на струйных событиях, в которых рождается одна струя с большим поперечным импульсом, а остальные частицы образуют "пьедестал" (underlying event). Будут измерены инклюзивные характеристики. Затем будут изучаться другие процессы Стандартной модели с рождением W-, Z-бозонов и топ-кварков. Более точные значения масс W, Z и t, полученные на ATLAS и CMS, могут привести к более точным ограничениям на массу бозона Хиггса в рамках Стандартной модели. Эти ограничения будут сопоставлены с результатами по радиационным поправкам на LHCb. Всё это необходимо для установления соответствия с данными, полученными при более низких энергиях.

И только потом должны начаться поиски бозона Хиггса, которые потребуют очень хорошего выделения специальных сигналов (типа двухфотонной моды распада бозона Хиггса) из многих других сигналов, поступающих от других источников. Рассматриваются и различные каналы рождения бозона Хиггса. Оценки показывают, что при наименьших возможных массах интегральной светимости около 5 fb^{-1} будет достаточно для того, чтобы вскоре обнаружить бозон Хиггса, но для детального анализа потребуется более длительное время.

Ситуация с суперсимметричными частицами во многом зависит от значений их масс. Например, если масса глюино окажется меньше, чем 1,2 ГэВ, то будет достаточно набрать $0,1 \text{ fb}^{-1}$ интегральной светимости для того, чтобы после подробного анализа заявить об её открытии. Чёткие указания можно будет получить на LHCb, где измерения процессов, сильно подверженных влиянию радиационных поправок за счёт виртуальных состояний, могут опередить прямые наблюдения счастливиц. Оптимисты утверждают, что важные новости могут появиться уже через несколько месяцев стабильной работы LHC, если нам повезёт и массы частиц окажутся достаточно низкими.

Мы надеемся, что уже на начальном этапе благодаря большей точности измерений на LHC процессы с b-кварками раскроют нам новые стороны проблемы нарушения CP-симметрии и помогут в решении загадки о барионной асимметрии Вселенной.

Поскольку протон при высоких энергиях можно рассматривать как широкополосный источник партонов, станет доступным для изучения множество эксклюзивных процессов. Например, удастся разделять рассеяния кварков на кварках, кварков на глюонах и глюонов на глюонах. Можно будет изучать их взаимодействия с помероном и померон-померонные взаимодействия. Сильные электромагнитные поля сталкивающихся ядер могут привести к новым интересным эффектам в $\gamma-\gamma$ -процессах и вызвать неожиданные асимметрии.

Конечно, в первую очередь были бы интересны новые, непредсказанные, процессы.

7. Дальнейшие шаги

Дальнейшие направления исследований на LHC в значительной степени зависят от тех открытий, которые

удастся сделать на начальном этапе. Если будет обнаружен бозон Хиггса, то он станет основным притягивающим центром исследований. Со всё увеличивающейся статистикой будут интенсивно изучаться его характеристики — масса, спин, аромат, сила связи и её зависимость от масс, СР-свойства и т.п.

Нечто похожее будет происходить, если будут открыты, скажем, глюино или гравитино. Светимость ЛНС позволяет изучать частицы с массами до 3 ТэВ, согласно проведённым оценкам. Каскадные распады столь тяжёлых частиц будут приводить к появлению более лёгких продуктов распада (среди них наиболее интересным сейчас представляется стау). Разные спины частиц в каскаде могут вызывать необычные корреляции, что поможет в попытках провести различие между разными возможными теориями (например, между суперсимметрией и дополнительными размерностями) путём корреляционных опытов. Однако эти эффекты могут быть небольшими, а их измерения — достаточно сложными, что поставит непростые задачи перед монтекарловскими программами.

Для физиков будет большим разочарованием, если не удастся найти никаких принципиально новых эффектов. Тем не менее имеется ряд интересных проблем, которые предстоит разрешить. Они возникают даже сейчас, например, в экспериментах на Тэватроне, где недавно были обнаружены неожиданные и пока не объяснённые пучки мюонов в стороне от сталкивающихся пучков. Необходимо также провести более точные расчёты в традиционной квантовой хромодинамике и сопоставить их с более точными экспериментальными данными при столь высоких энергиях. Более точные значения элементов СКМ-матрицы должны помочь в решении возникших проблем. Поведение ядерного вещества в соударениях ионов на ЛНС может оказаться весьма далёким от результатов простых экстраполяций. Вообще, трудно предсказать, какой путь выбран природой — один из известных нам сейчас или же совсем новый в новой области энергий. Придётся ждать экспериментальных данных от ЛНС, чтобы получить ответ на этот вопрос.

8. Перспективы физики высоких энергий

Остановится ли наше продвижение в области всё более высоких энергий после ЛНС? Конечно, нет, хотя каждый

шаг в этом направлении становится всё более и более дорогостоящим и требующим принципиально новых технологических и инженерных решений и он может быть предпринят только в рамках больших международных коллабораций.

Наиболее предвиденной ситуацией является предложение увеличить на порядок величины светимость ЛНС. Этот проект известен под названием SLHC (Super LHC). Он станет особенно привлекательным, если удастся обнаружить проявления тяжёлого бозона Хиггса во время действия ЛНС. Тогда потребуются увеличить статистику эксперимента, для того чтобы получить более определённые заключения. В целом, это расширит диапазон масс, в котором будут проводиться поиски хиггсовского бозона, суперсимметричных частиц и дополнительных размерностей.

Другим амбициозным проектом является Международный линейный коллайдер (ILC). Электроны и позитроны, движущиеся по прямолинейным траекториям навстречу друг другу, будут сталкиваться с полной энергией 1 ТэВ. Такие соударения легче интерпретировать теоретически, потому что электроны и позитроны не обладают столь сложной внутренней структурой, как протоны. Суперсимметричный мир можно будет изучать с хорошей точностью при больших массах. Повидимому, возникнет потребность в ещё более высоких энергиях — в несколько ТэВ (проект CLIC (Compact Linear Collider)), если надо будет исследовать частицы с ещё большими массами.

Эти проекты будут соревноваться с проектами, в которых предполагается удвоение энергии ЛНС (DLHC) или даже её утроение (TLHC).

Обсуждение и сопоставление различных возможностей выбора происходят уже сейчас. Конкретные решения можно будет принимать только после того, как станет доступна экспериментальная информация с ЛНС, которая даст ответы на поставленные выше вопросы. Будущее физики высоких энергий во многом зависит от этих результатов. Однако рано или поздно эти возможности превратятся в реальность (может быть, в несколько иной форме), потому что в человеческой природе заключено стремление познать всё больше и больше о строении окружающего нас мира и об основных силах, управляющих им.

Physics at the Large Hadron Collider

I.M. Dremin

*P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-495) 783-37 19
E-mail: dremin@lpi.ru*

The research program underway at the Large Hadron Collider (LHC) is quite impressive. Four major experimental facilities are operational to compete in collecting and processing data on hadron collisions at very high energies in the hope of answering the deepest and most fundamental questions ever asked concerning the structure of matter and space-time and what forces act in matter. The LHC accelerator and its four detectors are briefly described. Earlier information from other accelerators is presented. The key problems facing LHC research are identified and the succession in which they should be approached is discussed. Future prospects for high-energy physics are briefly considered.

PACS numbers: **12.10. – g, 12.60. – i, 29.20.db**

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **179** (6) 571 – 579 (2009)

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200906c.0571

Received 23 December 2008

Physics – Uspekhi **52** (6) (2009)