

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Г. А. Козлов, В. А. Матвеев, В. И. Саврин

**О ПОЛЬЗЕ УЧАСТИЯ В ПРОГРАММАХ
ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ**

Дубна • 2014

В подготовке издания принимали участие
Б. М. Старченко, Ю. Г. Мешенков, И. Ю. Щербакова

Козлов Г. А., Матвеев В. А., Саврин В. И.

К85 О пользе участия в программах по физике элементарных частиц при высоких энергиях. — Дубна: ОИЯИ, 2014. — 51 с., ил.

ISBN 978-5-9530-0398-8

В данном издании приводятся аргументы в пользу новых возможностей, которые получают наука, образование, промышленность, технологическая и информационная инфраструктура, экономика России от участия российских физиков в мировых программах по физике элементарных частиц при высоких энергиях. Обсуждаются вклады (участие) России в развитие ускорительных технологий, в создание детекторов частиц и их отдельных компонентов, а также в экспериментальную научную программу, перспективы для страны, связанные с участием российских молодых ученых, аспирантов и студентов в глобальных международных коллаборациях.

ISBN 978-5-9530-0398-8

© Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 2014

Введение

Исследования по физике элементарных частиц при высоких энергиях (для краткости в дальнейшем будем использовать аббревиатуру ФЧ) проводятся в основном большими международными коллаборациями в различных странах мира по причинам, связанным, главным образом, с тем, что специфика исследований требует создания крупных и дорогостоящих экспериментальных установок, например ускорителей частиц на гигантские энергии, достигающие десятка триллионов электронвольт, что зачастую не под силу реализовать одной стране.

В 1930 г. под воздействием идей норвежского инженера Р. Уайдеро 27-летний физик Э. Лоуренс вместе со своим студентом М. Ливингстоном в Калифорнийском университете в Беркли (США) создали первый циклический ускоритель частиц с диаметром около 13 см. Энергия ускоренных ионов водорода доходила до величины 80 тысяч электронвольт, а через год Лоуренс и Ливингстон приступили к сооружению 30-сантиметрового (в диаметре) ускорителя протонов на энергию 1 млн электронвольт. Сегодня национальные ускорительные лаборатории США в Беркли и Ливерморе носят имя Э. Лоуренса.

Ускорители частиц не только ускоряют последние, но и «делают» их более массивными. Согласно теории Эйнштейна, частицы, обладающие массой, не могут двигаться со скоростью, превышающей скорость света $c \sim 300$ тысяч километров в секунду. В современных ускорителях частицы, разгоняясь, достигают своей скорости v , близкой к скорости света, $v \approx c$. При приближении скорости пучка частиц все ближе и ближе к скорости света ускоритель становится бустером с точки зрения повышения кинетической энергии E этого пучка за счет увеличения массы m частицы, поскольку E , m и c связаны между собой знаменитым соотношением Эйнштейна $E = mc^2$. Поэтому повышение энергии пучка частиц в ускорителе возможно только за счет массы частиц.

Яркий пример успеха современной крупной коллаборации на базе мощного ускорителя — открытие в 2012 г. бозона Хиггса (Нобелевская премия по физике за 2013 г. П. Хиггсу и Ф. Энглеру) на кольцевом ускорителе протонов со встречными пучками этих частиц — Большом адронном коллайдере LHC (рис. 1) в Европейской организации ядерных исследований CERN (далее ЦЕРН) в Женеве (Швейцария) учеными из десятков стран, сотен институтов мира.

Рис. 2 демонстрирует результаты по первым наблюдениям бозона Хиггса.

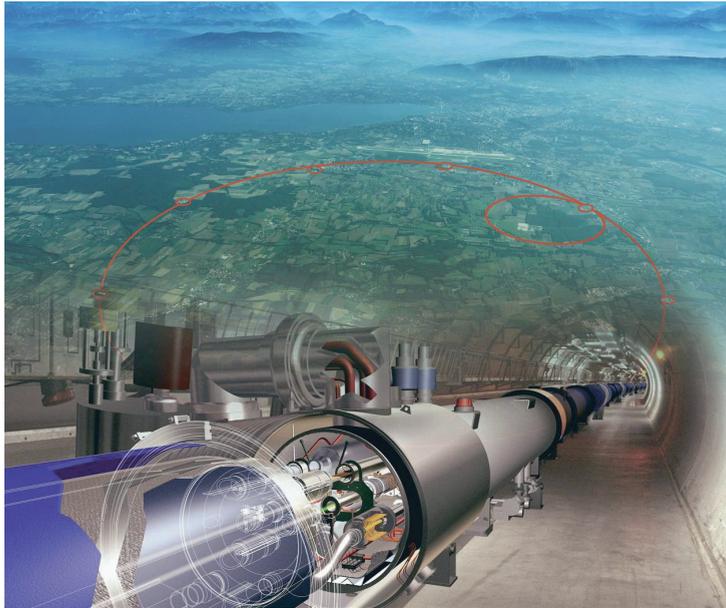


Рис. 1. Аэрофотоснимок местности в окрестностях Женевы (Швейцария), где проложен тоннель коллайдера на глубине 100 м, и непосредственно сам коллайдер (фотоколлаж из архива ЦЕРН)

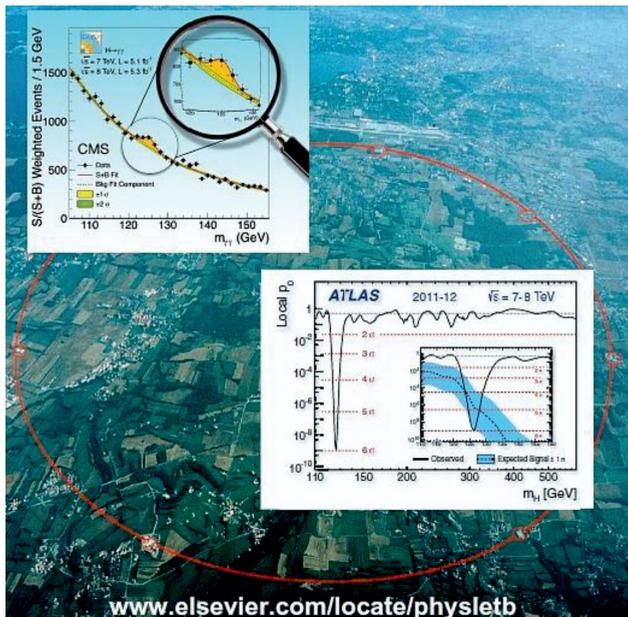


Рис. 2. Результаты коллабораций ATLAS и CMS [2, 3] по первым наблюдениям новой частицы в исследованиях по поиску бозона Хиггса в рамках Стандартной модели на LHC из специального выпуска журнала «Physics Letters B» [1]

Россия получила прекрасную возможность в режиме реального времени участвовать во всех экспериментах (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) на LHC и активно формировать предложения для новых исследований в ЦЕРН на последующие 15–20 лет. Особую значимость имеет участие молодых российских ученых и специалистов в грандиозных программах ЦЕРН. Несмотря на то, что коллайдер LHC и детекторы частиц располагаются на территориях Швейцарии и Франции, вклад России в создание самого коллайдера, подготовку экспериментов и их проведение весьма существенен [4, 5].

Целью настоящей статьи является прояснение концепции вовлечения России в глобальные научные проекты, в частности участие в коллаборациях в ЦЕРН и в других лабораториях мира. Мы надеемся, что этот материал может быть полезен коллегам, особенно молодым, работающим в области ФЧ, при подготовке и формировании новых идей в этой области науки. Возможно, эта статья будет небезынтересна специалистам в других областях науки, а также государственным административно-управленческим органам, которые неравнодушны к успешной реализации и поддержке программ по ФЧ, для понимания того, какую конкретную пользу это принесет России.

При обсуждении участия России в планируемых программах по ФЧ неизбежно возникает вопрос: что дает российской экономике поддержка исследований, проводимых на ускорителях частиц? Ответить на этот вопрос непросто без понимания, как «устроена» типичная глобальная научная коллаборация и как она функционирует. Для начала в последующих трех посылах-задачах проясним, для чего налогоплательщики и Правительство России поддерживают фундаментальную науку, инвестируя в нее солидные денежные средства:

- для того, чтобы Россия продолжала быть интеллектуальным звеном в мире, где «производятся» фундаментальные знания и открытия, позволяющие понять природу материи, пространства и времени;
- для производства высокотехнологичного оборудования, поощряя экономику России в плане как итоговой конструкции, так и развития технических методов и инструментов, необходимых для изготовления этих конструкций, — это можно назвать «инновационным вкладом»;
- для обучения и подготовки молодых ученых с точки зрения современных методов научного искусства и высоких технологий для производства научных приборов с широким горизонтом использования — это можно назвать «вкладом в будущее».

В статье продемонстрировано, как участие России в LHC и других крупных проектах с ускорителями частиц соотносится с этими тремя задачами. Однако логика наших аргументов может быть распространена и на другие структурированные объединения (коллаборации) по физике частиц.

В разд. 1 рассматривается роль России в развитии мировой фундаментальной науки. Разд. 2 посвящен инновациям, связанным с физикой частиц. В разд. 3 рассмотрены бонусы, получаемые от вкладов в ускорительные коллаборации,

на примере выездных экспериментов. Об участии России в создании коллайдера LHC и детекторов частиц рассказано в разд. 4 и 5 соответственно. Заметки о модернизации LHC даны в разд. 6. В разд. 7 рассматриваются перспективы по участию России в проекте международного линейного коллайдера ILC. Разд. 8 посвящен участию молодых ученых России в глобальных международных коллаборациях. Заканчивается статья заключением и кратким списком используемой литературы.

1. Ведущая роль России в фундаментальной физике

«Mega-science», или «большая наука», — сегодня очень модное словосочетание для определения научных проектов, являющихся настолько масштабными и дорогими, что требуется концентрация значительных национальных ресурсов, а нередко и объединение усилий многих стран. Безусловно, и ранее создавались международные коллаборации, о чем свидетельствует история физики, но в сегодняшнем мире, характеризуемом глобальной и оперативной коммуникацией с быстрым перемещением ученых по планете на огромные расстояния, научные амбиции выводят «большую науку» на новый уровень. Во многих областях современной науки масштабные проекты становятся такими, что требуются значительные инвестиции с созданием коллабораций, объединяющих ученых из многих стран мира для выполнения поставленной научной задачи.

1.1. Масштабы «большой науки»

Физика частиц всегда была лидером в движении по реализации широкомаштабных проектов «большой науки». Создавались ускорители частиц — от циклотронов, которые могли уместиться на письменном столе, до установок, расположенных на территориях научных и образовательных институтов и университетов, вплоть до гигантских машин по ускорению частиц, как, например, синхрофазотрон в Дубне (СССР) (фото 1), протонный синхротрон У-70 в Протвино (СССР) (фото 2), протон-антипротонный коллайдер Tevatron (фото 3) в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL, США), протон-протонный коллайдер LHC с длиной кольца более 27 км (фото 4) в ЦЕРН и др.

Увеличение энергии и, соответственно, размеров установок сопровождалось консолидацией ресурсов, а ускорители располагались лишь в немногих научных центрах мира, имеющих устойчивый научно-организационный и международный авторитет. Повышение энергии ускорителей необходимо для более прецизионного исследования микромира, понимания природы сил, ответственных за взаимодействие частиц и полей материи. Понятно, что решение этих задач возможно осуществить лишь на ничтожно малых расстояниях, что, естественно, требует повышения энергии взаимодействующих частиц, разгоняемых в ускорителях.



Фото 1. Синхрофазотрон

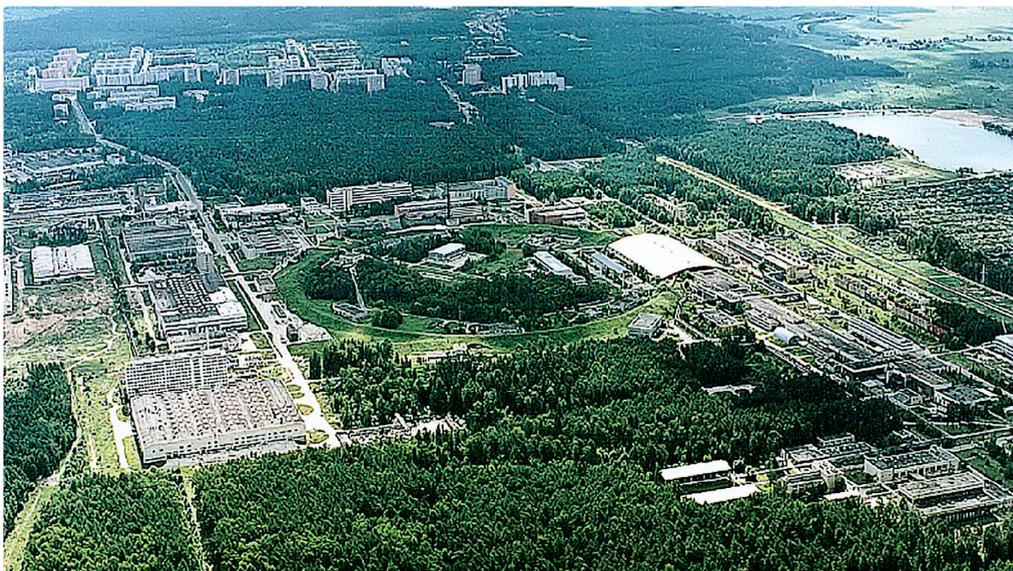


Фото 2. У-70



Фото 3. Коллайдер Tevatron (фото из архива FNAL)

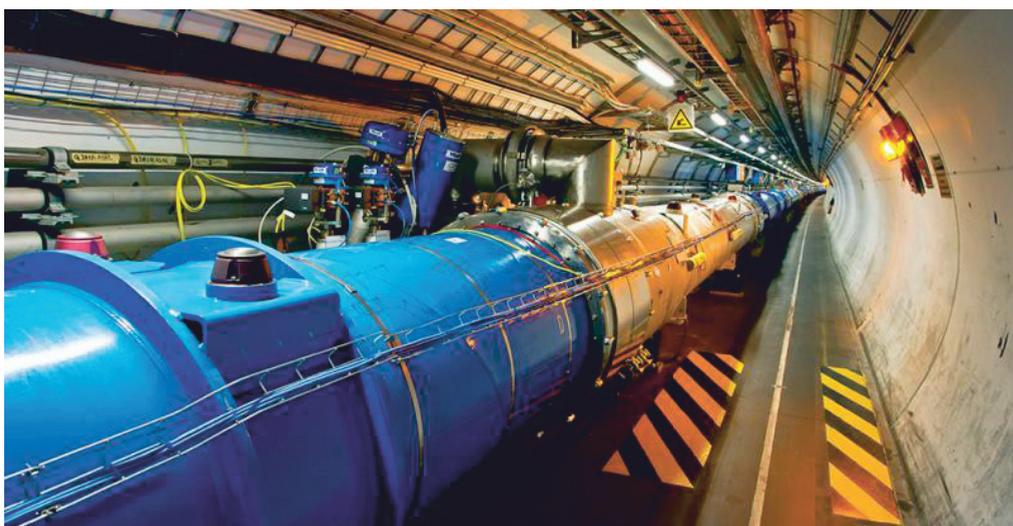


Фото 4. Коллайдер LHC (фото из архива ЦЕРН)

Самым большим действующим ускорителем заряженных частиц на сегодня является Большой адронный коллайдер LHC в ЦЕРН. Стоимость его сооружения, включая расходы на персонал и необходимые материалы, по оценке ЦЕРН составляет около 5 млрд швейцарских франков [6], что в значительной степени было покрыто непосредственно за счет ЦЕРН в виде финансовых вложений

20 стран-членов этой международной европейской организации*, а также при участии России, США, Японии и других стран, внесших свой неденежный вклад в виде поставок оборудования, его монтажа и других услуг. Сооружение четырех больших детекторов частиц ALICE, ATLAS, CMS и LHCb, расположенных на коллайдере, было выполнено в рамках международных консорциумов. Вклад ЦЕРН в стоимость этих детекторов составил 1 млрд 362 млн швейцарских франков [6], включая зарплату персонала. Учитывая, что ежегодные расходы на работу коллайдера, обслуживание его технических систем составляют более 300 млн швейцарских франков [7], к настоящему времени полная стоимость проекта LHC приближается к 9 млрд швейцарских франков — это действительно показатель «большой науки» в любом измерении.

С 1993 г. Россия имеет статус наблюдателя в ЦЕРН. В конце 2012 г. Россия направила в ЦЕРН заявку на получение статуса ассоциированного члена Европейской организации, а в сентябре 2013 г. на заседании Совета ЦЕРН эта заявка была поддержана. Ожидается, что подписание Соглашения об ассоциированном членстве России в ЦЕРН может произойти в 2014 г. При этом ежегодный взнос России в ЦЕРН составит около 8 млн швейцарских франков, что равняется 10% от той суммы, которую Россия должна была бы ежегодно вносить в бюджет ЦЕРН (в 2013 г. бюджет ЦЕРН составил более 1,2 млрд швейцарских франков), имея полноправное членство.

Российские научные организации, а это 12 институтов и университетов, а также Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне, участвуют в 18 проектах ЦЕРН. В настоящее время в этих проектах заняты около 700 российских специалистов, более половины из них входят в состав соавторов публикаций по результатам исследований, проводимых на установках ЦЕРН.

Основные усилия российских научных организаций направлены на участие в экспериментах на Большом адронном коллайдере: ATLAS, CMS, ALICE и LHCb [4, 5]. Главные цели этих исследований: проверка Стандартной модели взаимодействий частиц, поиск бозона Хиггса и исследование его свойств во взаимодействиях с полями материи, поиск проявлений «новой физики», например, суперсимметрии, дополнительных измерений пространства-времени, темной материи, а также исследование экстремальных состояний материи с целью понимания возникновения и эволюции Вселенной и изучение распадов B -мезонов для объяснения барионной асимметрии во Вселенной.

Российские научные организации и промышленные предприятия внесли большой и признанный интеллектуальный и материальный вклад в разработку и создание как самого ускорителя LHC, так и четырех его детекторов. Участниками проектов в ЦЕРН являются следующие российские центры, институты, университеты, организации:

* В январе 2014 г. Израиль стал 21-м членом ЦЕРН.

➤ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» в составе: РИЦ «Курчатовский институт», ГИЦ «Институт физики высоких энергий», ГИЦ «Институт теоретической и экспериментальной физики», Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова;

➤ Российская академия наук в составе: Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения, Институт ядерных исследований, Физический институт им. П. Н. Лебедева, Санкт-Петербургский физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе;

➤ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова;

➤ Санкт-Петербургский государственный университет;

➤ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»;

➤ Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»: РФЯЦ «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики».

Отдельным ярким примером «большой науки», связанной с ускорителями частиц, являются эксперименты по изучению нейтрино — слабо взаимодействующей частицы с почти нулевой массой покоя по сравнению с уже открытыми другими элементарными частицами. Эти эксперименты действительно глобальны и по пространственным масштабам, и по их стоимости. Суть экспериментов заключается в том, что нейтрино, испущенные из ускорителей частиц в одном месте, можно зарегистрировать в детекторах, расположенных за многие сотни километров. При этом события с зарегистрированными нейтрино позволяют исследовать поведение последних во время «пролета». Нейтрино очень неохотно вступают во взаимодействие с полями материи, что позволяет им почти беспрепятственно проходить через толщу Земли и появиться в детекторах, о которых упоминалось выше. В ноябре 2013 г. дальний детектор NOvA (NuMI Off-Axis ν_e Appearance), расположенный на севере штата Миннесота (США), с массой около 14 тысяч тонн, зарегистрировал первые нейтрино, посланные из Лаборатории FNAL, расположенной в штате Иллинойс на расстоянии около 810 км от детектора. В Европе исследования по этой тематике активно проводятся в рамках международной коллаборации, объединяющей ученых многих стран мира. Отметим, например, эксперимент OPERA, получивший недавно яркие результаты по исследованию свойств нейтрино, где источником последних является протонный суперсинхротрон SPS (ЦЕРН), а сам детектор OPERA с общей массой 1300 тонн расположен в подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия) на расстоянии около 730 км. Целью таких широкомасштабных ускорительных экспериментов является исследование фундаментальных свойств малоизученной частицы нейтрино, в частности, редчайшие явления осцилляций нейтрино, т. е. трансформации (переходов) одного типа нейтрино в другой (например, нейтрино мюонное — в нейтрино электронное и др.). Во всех отмеченных выше нейтринных экспериментах активное участие принимают ученые России и ОИЯИ.

Современные научные проекты с масштабom стоимости в миллиарды долларов можно найти во многих (научных) дисциплинах. Отметим лишь некоторые из них (без претензии на полноту и объективность описания). В исследованиях по физике материалов под объединяющим началом Отделения фундаментальных наук Министерства энергетики США (DOE) действует распределенный комплекс, состоящий из четырех основных источников синхротронного излучения совместно с ядерным нейтронным источником и с LCLS X-лучевым лазером стоимостью около 4 млрд долларов [7]. Европейские лаборатории с нейтронными и лазерными пучками оцениваются приблизительно в таком же денежном выражении. Вначале эти лаборатории начинали работать как национальные венчурные коллективы, но впоследствии они трансформировались в европейские коллаборационные структуры, такие как европейский комплекс XFEL (European X-ray Free Electron Laser) — лазерная рентгеновская установка, в создании которой принимают участие 12 стран. С помощью мощнейших вспышек в лабораторных условиях лазер будет способен распознавать механизм химических реакций с разрешением на уровне отдельных атомов.

Россия обладает уникальным потенциалом в области разработки и «производства» ускорительной техники в широком диапазоне энергий мирового класса. В области высоких энергий достаточно отметить подготовку, поставку и монтаж специального оборудования для Большого адронного коллайдера. Чрезвычайно перспективными являются масштабные работы новосибирских ученых и специалистов из Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) по участию в разработках и в сооружении бустерного синхротрона, являющегося одним из основных элементов источника синхротронного излучения NSLS-II (National Synchrotron Light Source II) стоимостью около 900 млн долларов, строительство которого осуществляется в Брукхейвенской национальной лаборатории (США). Созданный российскими учеными синхротрон по сути является ускорителем-накопителем электронов с окружностью 158 м, который способен за полсекунды разогнать пучок электронов с энергией до 3 млрд электронвольт. Основное предназначение источника NSLS-II — это фундаментальные исследования, например, в области биологии и медицины (исследования структуры сложных белков), физики (высотемпературная сверхпроводимость на уровне отдельных атомов) и др., а также прикладные работы, связанные, например, с созданием наноматериалов, необходимых для исследования живых тканей, и др. К 40 имеющимся в настоящее время в мире источникам синхротронного излучения в скором времени добавятся еще около десяти новых комплексных установок, одной из которых является NSLS-II.

В астрономии большая часть важных данных получается со спутников, имеющих уникальные конструкторские особенности в плане контроля и наблюдения в космосе в широком диапазоне частот, а также с использованием наземных интерферометрических оптических и радиообсерваторий, часто расположенных в необычных (с географической точки зрения) местах планеты. В 2011 г. програм-

ма пространственного телескопа «Хаббл», включая модернизацию последнего, оценивалась в 8 млрд долларов, а современная многообещающая американская национальная программа оптического сканирования Вселенной (пространственный телескоп Джеймса) уже имеет оценочную стоимость на начальном этапе около 8 млрд долларов [7]. Американская программа «Apollo» и Международная космическая станция оцениваются в более чем 100 млрд долларов каждая. Проекты по сбору больших данных для моделирования климатических и экосистем при исследовании биологических последствий имеют стоимостный уровень в миллиард долларов США [7]. В биологии проект по исследованию генома человека, поддерживаемый США через партнерство DOE и Национального института здоровья, оценивается в размере 4,6 млрд долларов [6]. Этот список может быть продолжен: например, комплекс ITER (Франция) — международный экспериментальный термоядерный реактор, разработанный на основе концепции «токамак», — имеет стоимостный масштаб 18 млрд долларов. Международный проект FAIR (Германия) стоимостью около 2 млрд долларов, в строительстве которого участвуют 10 стран, направлен на исследование ядерной материи при огромных значениях плотности вещества и его температуры, близких к критическим. Это позволит ученым с учетом независимых данных, полученных на коллайдере тяжелых ионов NICA в Дубне, приблизиться к пониманию, а может быть и разгадке, тайны рождения Вселенной в результате Большого взрыва. Россия участвует в реализации проекта FAIR со своим вкладом в 180 млн евро.



Фото 5. Нуклотрон, на базе которого создается ускорительный комплекс NICA в Дубне

В России в рамках консолидации интеллектуального потенциала и приборной базы к классу «большая наука» относятся, например, проекты:

— коллайдер тяжелых ионов NICA (Дубна, Объединенный институт ядерных исследований) стоимостью около 450 млн долларов;

— высокопоточный пучковый исследовательский комплекс ПИК (Гатчина, Институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт») — около 1 млрд долларов;

— источник синхротронного излучения КИСИ (Москва, НИЦ «Курчатовский институт») — около 1 млрд долларов;

— новый электрон-позитронный коллайдер с рекордной светимостью — Супер-чарм-тау фабрика (Новосибирск, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН) — около 500 млн долларов и др.

Многие из перечисленных мегапроектов нашли отражение в плане их реализации в Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. [8] и в Государственной программе Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 гг. [9], утвержденных Правительством Российской Федерации в 2012 г.

Однако современные и планируемые эксперименты на ускорительных установках класса «большой науки» невозможны без статистического анализа больших объемов данных, получаемых с детекторов частиц, и детального сравнения с результатами теоретического моделирования. Поэтому одной из основных составляющих «большой науки» является задача по созданию, поддержанию и развитию распределенной компьютерной инфраструктуры для хранения, моделирования и анализа данных. Пользователями результата решения этой задачи являются все ученые в различных уголках мира, участвующие в конкретном эксперименте.

Такой мировой компьютерной инфраструктурой нового типа, обеспечивающей глобальную интеграцию информационных и вычислительных ресурсов на основе WWW/Internet глобализации обмена информацией, с учетом программного обеспечения нового поколения, является система «Грид» (в английской версии GRID — по аналогии с электрическими сетями — electric power grid). С начала 2000-х гг. в мире активизировались работы по созданию глобальной распределенной вычислительной системы, и к настоящему времени в этой сети участвуют сотни научных центров мира, работают тысячи и тысячи компьютеров различной мощности, хранятся гигантские массивы научных данных.

Научные центры России: НИЦ «Курчатовский институт», НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова и др., а также ОИЯИ с самого начала приняли активное участие в этих работах. В результате создана и развивается технология Грид, наращиваются компьютерные мощности, совершенствуются каналы связи и т. д. Создана уникальная разветвленная структура, объединяющая компьютерные центры ОИЯИ, ЦЕРН с вычислительными комплексами научных организаций, лабораторий и университетов мира, обеспечивается до-

ступ физиков России и ОИЯИ к практически неограниченным мировым вычислительным ресурсам. Все это позволяет говорить об уникальной для российской науки и образования возможности полноценного доступа к обработке гигантских массивов экспериментальных данных и на основе этого получения новых научных результатов, об опыте по освоению, применению и дальнейшему развитию новейших информационных технологий в стране.

Альтернативы «большой науке» нет. Масштабные научные комплексы и установки позволяют совершать научные открытия, что, похоже, невозможно в проектах малых масштабов. В физике частиц, например, коллайдер ЛHC, ассоциированный с огромной организованностью в плане научных исследований и глобальным международным участием, явился абсолютно необходимым инструментом для открытия бозона Хиггса. Заглядывая в будущее, можно утверждать, что следующее поколение ускорителей частиц на высокие энергии, например, новый протон-протонный коллайдер FCC (от англ. Future Circular Collider) на энергию 100 тэраэлектронвольт (ТэВ) в ЦЕРН (длина кольца коллайдера 80–100 км в зависимости от напряженности магнитного поля), будет совершенно точно необходимо для открытия в лабораторных условиях новых частиц с массой (покоя) в ТэВ-ном диапазоне (рис. 3).

Чрезвычайно важным становится понять, как наиболее эффективно организовать управление проектами, оценить пользу для страны от реализации этих проектов и спрогнозировать интеллектуальное лидерство в проектах масштаба «большая наука».

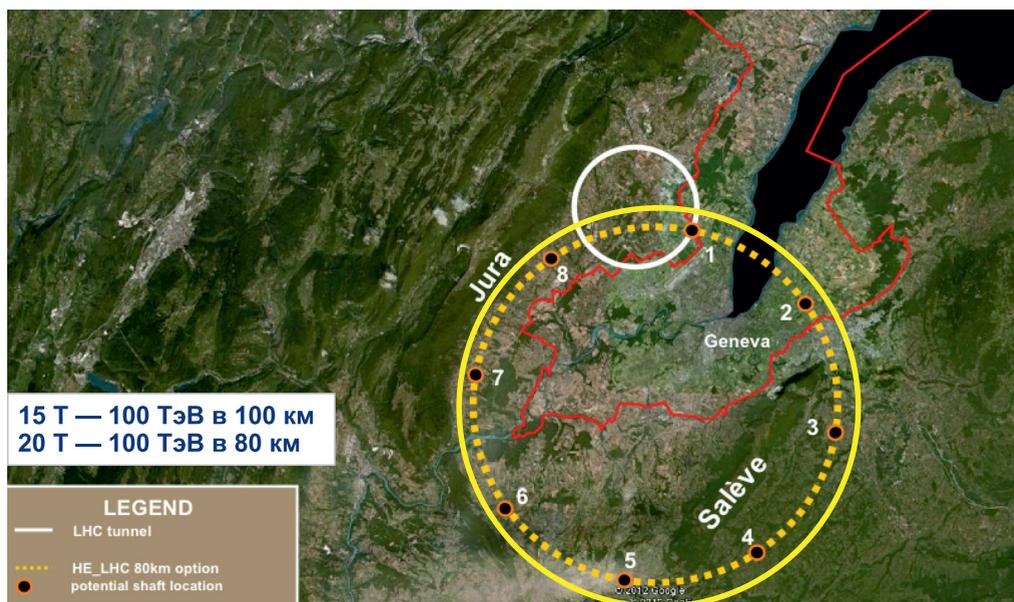


Рис. 3. Схема возможного расположения коллайдера FCC в окрестностях Женевы. Хорошо видно кольцо действующего коллайдера ЛHC с длиной окружности 27 км [10]

1.2. Как организованы проекты «большой науки»

Может показаться, что многомиллиардные проекты организованы как высокоструктурированное дерево с хорошо организованным менеджментом и с корпоративно-подобным фокусом, нацеленным на ответственность, производительность и результат. Однако большие проекты по физике частиц никогда не подчинялись этой схеме. Здесь традиции выросли из культуры небольших научно-экспериментальных групп, в которых все члены коллектива были творчески активными, а решение принималось коллегиально на основе консенсуса. Насколько это возможно, современная структура больших коллабораций по физике частиц сохраняет эти идеалы в рамках демократичной структуры научного менеджмента [7].

Как правило, коллаборация возглавляется руководителем (в англ. *spokesperson*), а в некоторых случаях и двумя соруководителями, за которыми остается окончательное слово при принятии решения. Руководители выбираются представителями коллаборации и выполняют свои обязанности в течение определенного периода времени. Руководитель коллаборации пользуется доверием ее членов, а также, что немаловажно, доверием и поддержкой принимающей лаборатории (института), где проводится эксперимент, и других лабораторий — партнеров по эксперименту. Другие выбранные исполнительные (или ответственные по направлениям) лица в коллаборации обеспечивают всю координацию по физическому анализу, по поддержке в работоспособном состоянии детектора частиц, его улучшению и модернизации. Под началом ответственных по направлениям находятся рабочие группы, возглавляемые так называемыми конвинерами (от англ. *convener* — организатор, координатор). Последние, а их может насчитываться десятки человек, обеспечивают подготовку и проведение физического анализа или работу по совершенствованию отдельных компонентов и узлов детектора.

Далее, существуют специальные комитеты, которые, например, регулируют процесс подготовки публикаций, организуют конструкторские работы, обеспечивают разработку стратегических планов исследований и т. д. Зачастую позиции руководителей этих специальных комитетов являются также выборными, но случаются и обычные назначения.

Важная роль принадлежит отдельным группам, ответственным за разработку, конструирование и обновление аппаратуры. Руководители этих групп выбираются из числа наиболее компетентных в соответствующем техническом плане членов коллаборации. Вычислительная инфраструктура, особенно грид-комплекс (для распределенных вычислений, хранения и передачи данных на большие расстояния), является одним из наиболее существенных компонентов в технической поддержке конкретного эксперимента.

Необходимо специально отметить, что принимающая страна или принимающая лаборатория (институт) не обладают специальными привилегиями в плане назначения на какие-либо руководящие позиции в рамках коллаборации.

Российские физики внесли свой существенный вклад в руководство крупными коллаборациями в качестве их руководителей и соруководителей, например, А. И. Голутвин (из ГНЦ ИТЭФ, Москва) — руководитель эксперимента LHCb на LHC в 2008–2011 гг., Д. С. Денисов (из ГНЦ ИФВЭ, Протвино) — соруководитель эксперимента D0 на тэватроне (коллаборация объединяет 600 физиков из 18 стран мира) и др.

1.3. Разделение международной ответственности за большие проекты

Большие научные проекты имеют как свою (затратную) стоимость, так и элементы выгоды (пользы или бонусов). Страна, которая вносит значительную часть в стоимость проекта, находится в выгодном положении, когда ее национальная промышленность получает заказы, необходимые для осуществления проекта, что, естественно, приводит к развитию национальной технологической индустрии [7]. Получение специальных бонусов (выгоды) относится также и к национальной или региональной лаборатории (институту), которые «принимают (размещают) у себя» глобальный проект. Примеры тому — ЦЕРН (коллайдер LHC, компактный линейный коллайдер CLIC и др.), ОИЯИ (комплекс NICA, фабрика сверхтяжелых элементов и др.), FNAL (протон-антипротонный коллайдер Tevatron, ускоритель протонных пучков высокой интенсивности Project X и др.), Япония (международный линейный коллайдер ILC и др.).

На специальной сессии Совета ЦЕРН (Лиссабон, 14 июля 2006 г.) была единодушно одобрена «Европейская стратегия развития физики частиц» [11]. В преамбуле этого документа записано: «Физика частиц стоит на пороге новых и завораживающих открытий. Последующее поколение экспериментов даст новые знания в этой области и позволит проникнуть в глубь пространства-времени. Они с беспрецедентной точностью определяют свойства элементарных составляющих вещества и их взаимодействий и обнаружат новые явления, такие как существование бозона Хиггса и новых форм материи. Такие давно существующие тайны природы, как возникновение массы частиц, асимметрия материи и антиматерии во Вселенной и наблюдаемые темная материя и темная энергия, пронизывающие космос, вскоре будут объяснены на основе новых экспериментальных измерений. Все это глубоко повлияет на наше представление об устройстве нашей Вселенной».

Эти предсказания «Европейской стратегии...» уже отчасти сбылись — в 2012 г. открыт бозон Хиггса и исследованы многие другие явления, проясняющие фундаментальные свойства материи; российские физики в полной мере причастны к этим результатам. По инициативе ЦЕРН работа над развитием «Европейской стратегии...» продолжается в специально созданных международных рабочих группах и комитетах.

Каждая страна, участвующая в проектах «большой науки», имеет возможность выбрать проекты, которые она желает разместить на своей территории, или проекты, в которых страна будет участвовать в других регионах мира. Это чисто политическое решение, но оно связано и с особенностями культуры конкретной страны, развития науки, образования и промышленности в ней. Например, СССР и Россия, а также США были и остаются странами, выполняющими миссии по реализации масштабных научных проектов. Известный исторический статус ЦЕРН и его важная особенность как символа европейской кооперации определили направление средств Европейского сообщества на развитие ФЧ. Особая роль ОИЯИ как флага фундаментальной науки стран Восточной Европы, Азии, Кубы и других стран состояла в развитии многопрофильных проектов в физике частиц, ядерной физике и физике конденсированного состояния вещества. В Азии, в частности в Японии, сильные культурные традиции в физических науках и требования, предъявляемые политикой к национальной индустрии, были также сориентированы на инвестиции в развитие физики частиц.

Для активно работающих профессиональных физиков наиболее важным является определить стратегически правильные пути в развитии фундаментальной науки. Это относится и к профессорскому составу учебных заведений страны, ответственных за подготовку студентов, которым предстоит внести решающую лепту в получение новых результатов от «большой науки».

Российская система научно-исследовательских институтов, включая учреждения Российской академии наук, не имеет аналогов в мире. Ее успех основан на традициях отечественной фундаментальной науки и научных школ, на уникальных способах продуцирования новой научной мысли с возможностью подкрепления ее способными и талантливыми молодыми учеными для продвижения научных проектов. В эпоху глобальных коллабораций многие российские университеты и институты, как и образовательные учреждения мира, вовлечены в решение важных научных проблем, что дает студентам и аспирантам замечательные возможности внести свой вклад в определенные области исследований.

Поэтому очень важным является понимание того, что участие России в основных физических проектах, расположенных за рубежом, сохраняет все отмеченные выше преимущества и потенциальные возможности для достижения успеха страны. Важным также является понимание того, что это участие сохраняет и увеличивает степень пользы и выгоды, которыми интересуется общество при направлении инвестиций в фундаментальную науку. Возможно, что это могло бы быть некоторой мерой при сравнении целесообразности размещения глобальных проектов в России и проектов с инвестициями аналогичного масштаба, например, в ускорительные комплексы, размещенные за рубежом.

2. Физика частиц и инновации

Во многих областях науки необходимая для ее развития технология нередко обеспечивается на коммерческой основе и приобретает учеными вместе с оборудованием для использования в своих лабораториях. Например, химики и биологи покупают штатные оптические и инфракрасные спектрометры вместе с лабораторными сосудами и настольными компьютерами. Однако в некоторых областях физики требуется уникальное экспериментальное оборудование, которое может быть разработано и произведено лишь самими учеными и работающими вместе с ними инженерами. Физика частиц является наиболее характерной в этом плане, поскольку здесь речь идет об ускорителях и детекторах, компоненты которых по своим техническим характеристикам могут иногда превышать некоторый имеющийся стандарт современного технического искусства. Разработка, конструирование и поддержка в работоспособном состоянии этих сложных устройств является существенной частью искусства науки в области ФЧ [7].

Как медаль имеет две стороны, так и здесь имеется как ответственность (обязательства), так и польза в случае успеха. Ответственность заключается в том, что научные коллективы должны постоянно искать и находить новые технологические решения, направленные на научный результат в конечном итоге. Польза (бонус) проявляется в том, что российская промышленность и система образования получают дополнительный потенциал для подготовки и создания новых прорывных технологий. Немаловажно и то, что нестандартные, оригинальные, инновационные решения в развитии новейших технологий могут быть в дальнейшем «выложены» на рынок с неожиданной для обычного бизнеса стороны и с наибольшей выгодой. Это прежде всего относится как к ускорительным, так и к детекторным компонентам, а также к электронике и вычислительным средствам в смысле их развития и целевого использования.

Один из характерных примеров развития новых технологий — разработка ускорителей для прикладных исследований и задач общего назначения. Мировому научному сообществу для исследований в ближайшее время необходимы лишь несколько супермашин с энергией масштаба ТэВ для ускорения электронов или десятков ТэВ для сталкивания между собою пучков протонов. Коллайдер LHC, например, почти удовлетворяет запросам физиков на современном этапе исследования физики микромира, скажем, поиска проявления расширений Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц, столь хорошо зарекомендовавшей себя с открытием на LHC бозона Хиггса с массой около 125–126 гигаэлектронвольт (ГэВ) в 2012 г. В то же время в мире сегодня насчитывается около 30 тысяч действующих ускорителей частиц, и каждый 100-й из них «работает» на фундаментальную науку [12]. Почти 70 компаний в мире производят около 1000 различных ускорителей в год [7], что обеспечивает существенное развитие новой технологической инфраструктуры в широких областях индустрии, связанных, например, с медициной, стерилизацией продуктов, производством мембран

и тончайших пленок-фильтров с мельчайшими отверстиями (получаемых в результате «бомбардировки» ионами, ускоренными в циклотронах), изготовлением оборудования для обеспечения контроля и безопасности на транспорте и др. Научно-технические инновации из фундаментальной науки переходят в промышленность, и, что важно, специалисты по ускорительной тематике также переходят во все более расширяющуюся область ускорительной индустрии, а корни всего проистекают из начала решения чисто научных проблем. Отсюда можно сделать краткий вывод: решение задач «большой науки», в том числе в рамках международных коллабораций, позволяет создать для конкретной страны условия для развития новой промышленности с капитализацией в сотни миллиардов долларов [7]. Можно сказать, что физика высоких энергий — это локомотив развития новых высоких технологий, находящих применение во многих областях жизнедеятельности людей.

Все это напрямую относится к российскому технологическому развитию как следствие участия ученых и специалистов России в коллаборациях по ускорительной науке и технике, а также разработке детекторов частиц, даже если эти инструменты располагаются за рубежом.

3. Вклады и бонусы от участия в ускорительных коллаборациях в выездных (зарубежных) проектах

Ускорительные проекты с расположением вне территории России принесут пользу внутри нашей страны в различных областях, например в научной, экономической, технологической, социальной. Сначала обсудим эти бонусы в общих чертах, затем дадим более детальный разворот на примере двух глобальных программ — проекта модернизации коллайдера LHC и проекта создания международного линейного коллайдера ILC (с вероятным расположением в Японии) длиной более 30 км для ускорения и столкновения между собою электронов и позитронов с энергией до 1 ТэВ.

Международная кооперация в ускорительных проектах несколько отличается от кооперации по экспериментам в физике частиц: ускорительные проекты бывают большими по своему масштабу, а ускорительное научное сообщество, как правило, небольшое. Рост стоимости ускорителя напрямую зависит от увеличения энергии ускоряемых им частиц. Это приводит к повышению важности распределения стоимости установки между участниками кооперации (странами, институтами) с использованием элементов экономии ресурсов. Сравнительно небольшой коллектив ускорительного физического сообщества делает более легким процесс объединения усилий и разделения труда (ответственности) между участвующими сторонами, а также позволяет найти наиболее эффективным способом ключевые идеи в плане решения общих проблем. Обе составляющие — масштабность ускорителей и небольшое ускорительное сообщество — дают наи-

высший вклад в успех решения задачи, когда кооперация в разработке ускорителя и его сборке становится интернациональной [7].

Можно было бы привести много примеров, когда выделение ресурсов в международных масштабах приводило к лучшим результатам в сравнении с тем, как если бы одна страна пыталась их достичь самостоятельно. Один из наиболее ярких примеров — коллайдер LHC. Большие дипольные магниты, заполняющие 27-км кольцо коллайдера, — это результат в основном европейского вклада [7]. Однако LHC требуется оснастить также специальными магнитами для совершенно конкретных целей и задач. Создание условий для взаимодействия частиц с высокой светимостью требует мощных специализированных квадрупольных магнитов с высокой интенсивностью магнитного поля. Эта задача была решена странами, не являющимися членами ЦЕРН: разработка дипольных и квадрупольных магнитов была произведена в ИЯФ СО РАН, в национальных лабораториях США в кооперации с Организацией по изучению высокоэнергетических ускорителей КЕК в Японии. Это было принято («засчитано») в ЦЕРН как вклад России, США и Японии в создание LHC.

4. Участие России в создании коллайдера LHC

Международное научно-техническое сотрудничество с ЦЕРН всегда было экономически выгодно для России, особенно в последние 20 лет. Дело в том, что в России традиционно сложились всемирно признанные научные школы в области исследования фундаментальных свойств материи, и в то же время экономическая ситуация в начале 1990-х гг. вынудила приостановить наиболее крупные проекты России в данной области науки. Использование уникальной экспериментальной базы ЦЕРН и участие в крупных научных проектах, реализация которых не под силу одному даже самому экономически развитому государству, было одной из немногих возможностей сохранить имеющийся научный потенциал России, на создание которого страной были затрачены колоссальные средства в течение нескольких десятилетий.

На всех уровнях руководящих органов ЦЕРН постоянно подчеркивалось, что вклад ученых и специалистов, институтов и предприятий России в разработку и реализацию проекта Большого адронного коллайдера исключительно велик. Это касается не только материально-технического обеспечения ряда ключевых позиций, но и использования передовых идей и достижений в физике и технике ускорителей. Не случайно две улицы на территории ЦЕРН носят имена отечественных ученых, внесших основополагающий вклад в мировую ускорительную науку, — В. И. Векслера и Г. И. Будкера.

Пять государств, не являющихся членами ЦЕРН: Индия, Канада, Россия, США и Япония — внесли вклад в сооружение ускорителя. Вклад России составил около 3 % общей стоимости LHC. Экспериментальные установки сооружались за

счет средств стран, участвующих в соответствующих экспериментах. Российские научные организации участвуют во всех четырех экспериментах, и вклад России в них составляет около 5% [5].

В рамках «Соглашения между Европейской организацией ядерных исследований (ЦЕРН) и Правительством Российской Федерации о дальнейшем развитии научно-технического сотрудничества в области физики высоких энергий» от 30 октября 1993 г. был учрежден Комитет по сотрудничеству Россия–ЦЕРН, сопредседателями которого являются министр образования и науки Российской Федерации и генеральный директор ЦЕРН. Задача комитета — утверждение конкретных научных, технических и организационных проектов и программ, рассмотрение их реализации.

В октябре 1995 г. комитеты по научной политике национальных российских программ по физике высоких энергий и фундаментальной ядерной физике на заседании, проходившем в г. Сарове, приняли важное решение: *участие в создании коллайдера LHC и крупнейших экспериментальных комплексов ALICE, ATLAS и CMS определяется как важнейшее направление национальной программы России по физике частиц.*

14 июня 1996 г. к вышеназванному соглашению 1993 г. был подписан Протокол об участии в проекте «Большой адронный коллайдер» — приоритетном и глобальном научном проекте на рубеже XX и XXI вв. Во исполнение обязательств, сформулированных в этом протоколе, в 1998 г. российской стороной и ЦЕРН были подписаны меморандумы о взаимопонимании по сооружению детекторов ATLAS и CMS, несколько позже — по сооружению детекторов ALICE и LHCb. В документах был зафиксирован вклад России в сооружение детекторов. Параллельно с подписанием меморандумов по каждому детектору были подготовлены и подписаны еще четыре дополнения к протоколу 1996 г., в которых детализировалось распределение российского финансирования, вкладов коллабораций и вклада России по отдельным подсистемам детекторов, в сооружении которых участвуют российские институты.

Для обеспечения выполнения обязательств России в 1999 г. Миннауки и Минатомом России было принято совместное решение о финансировании работ российских институтов, участвующих в создании Большого адронного коллайдера и детекторов, подписанное 25 января 1999 г. В последующие годы принимались ежегодные решения Миннауки и Минатома России о совместном финансировании проекта LHC. В соответствии с соглашением 1993 г. по распоряжениям Правительства Российской Федерации Минфином России выделяются валютные средства на содержание российского персонала, проводящего работы в ЦЕРН в рамках принятых обязательств. В качестве дополнительного обоснования для выделения необходимых средств в сентябре 2000 г. был подписан Протокол к вышеупомянутому соглашению 1993 г. о статусе российского персонала, участвующего в исследовательских проектах, предусматривавший оплату содержания персо-

нала, а также ежегодные взносы в эксперименты на покрытие эксплуатационных расходов.

Около 30% средств для выполнения обязательств России по проекту LHC выделил Росатом. В этом проекте российское «атомное» ведомство было представлено, кроме центров фундаментальной науки ГНЦ ИФВЭ и ГНЦ ИТЭФ, «своими» и федеральными ядерными центрами, которые фактически расширили сферу научно-технической деятельности, разрабатывая и создавая оборудование для детекторов.

В 2008 г. сооружение в ЦЕРН ускорителя LHC и детекторов ATLAS, CMS, ALICE, LHCb было завершено. По своим научным и технологическим масштабам они являются беспрецедентными. Показательно, что при поддержке Правительства Российской Федерации, Министерства образования и науки России и Федерального агентства по науке и инновациям России отечественные институты и промышленность смогли внести общепризнанный интеллектуальный и материальный вклад в создание уникального оборудования, без которого вряд ли удалось бы завершить этот глобальный проект в намеченные сроки.

В то же время участие в проекте LHC позволило привлечь зарубежные инвестиции в российские институты и промышленность в объеме около 120 млн швейцарских франков [5]. Это дало возможность российским институтам поддерживать научно-производственную базу, привлечь студентов, аспирантов и молодых ученых к передовым научным исследованиям, получить международные гранты и в результате сохранить свой научный потенциал.

Работа российских специалистов в ЦЕРН уже оказала существенное влияние на развитие инновационной деятельности и подготовку научных кадров в России. Ниже приведем ряд примеров, которые наглядно показывают появление и развитие в институтах и на предприятиях России уникальных технологий для разработки отдельных элементов и узлов Большого адронного коллайдера.

4.1. Резистивные магниты

Резистивные электромагниты применяются в коллайдере LHC в прямолинейных промежутках и предназначены для разделения пучков частиц, для коррекции орбиты пучков заряженных частиц, а также для формирования так называемых «очищающих вставок». Кроме того, резистивные дипольные и квадрупольные магниты применяются в каналах транспортировки пучков в коллайдер. Для реализации этой части программы потребовались электромагниты семи разновидностей, причем масса одного магнита, в зависимости от типа, колеблется от 0,5 до 18 тонн.

Электромагниты были разработаны российскими специалистами совместно с сотрудниками ЦЕРН и собраны в ИЯФ СО РАН при участии Новосибирского завода «Сибтекстильмаш». Некоторые типы магнитов представлены на фото 6.



Фото 6. Магниты

4.2. Дипольные и квадрупольные магниты

Для транспортировки пучков протонов с энергией 450 ГэВ из протонного синхротрона SPS в коллайдер LHC были построены два канала транспортировки пучка, протяженностью около 2,5 км каждый. В каналах использованы обыкновенные резистивные магниты со стальными сердечниками и медными катушками. Для формирования траектории пучков при их перепуске из SPS в основное



Фото 7. Дипольные магниты для каналов транспортировки пучка на складе в ЦЕРН



Фото 8. Дипольные магниты в тоннеле каналов транспортировки пучка

кольцо коллайдера ИЯФ СО РАН поставил в ЦЕРН для этих каналов 360 дипольных магнитов, 180 квадрупольных магнитов и 100 корректирующих магнитов (фото 7 и 8).

В производстве магнитов участвовали завод ЭФО НИИЭФА и московский Завод им. Владимира Ильича (ЗВИ). Работа выполнялась с 1996 по 2001 г. и была завершена с опережением графика, а после установки в тоннель коллайдера, при включении каналов, пучок частиц «пролетел» трассу с первого «выстрела»! За эту работу в 2002 г. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН был удостоен высокой награды ЦЕРН — «Золотой адрон».

4.3. Септум-магниты системы инжекции и поглощения пучка

Протонный пучок инжектируется из SPS (через описанные выше каналы транспортировки) в LHC с энергией 450 ГэВ с помощью вертикальных отклоняющих магнитов MSD (кикеров) и горизонтальных отклоняющих септум-магнитов MSI. Магниты MSD и септум-магниты MSI были разработаны и произведены в ГНЦ ИФВЭ (совместно с ЦЕРН) в 2003 г.

Магниты уникальны по техническим требованиям к величине и однородности магнитного поля (на уровне 10^{-4}). В ГНЦ ИФВЭ был организован полный цикл изготовления 45 септум-магнитов (фото 9).



Фото 9. Катушка септум-магнита (слева) и септум-магниты на участке сборки в ГНЦ ИФВЭ (справа)

4.4. Коммутирующие сверхпроводящие шины

Для обеспечения питанием магнитов (дипольных, квадрупольных или корректирующих), которые соединяются последовательно друг с другом, образуя цепи в каждом секторе, необходимо применение коммутирующих сверхпроводящих шин. Все производство последних было выполнено в ИЯФ СО РАН в 2000–2006 гг. (фото 10).

4.5. Системы вывода энергии из основных сверхпроводящих магнитов

Большинство сверхпроводящих магнитов коллайдера ЛНС во время рабочего режима требуют защиты в случае неожиданного, но возможного перехода проводника в резистивное состояние (срыв сверхпроводимости). Для того чтобы избежать локального перегрева, используется специальная система вывода энергии из сверхпроводящих магнитов. Разработка систем вывода энергии была проведена в ЦЕРН совместно с ГНЦ ИФВЭ и ИЯФ СО РАН, при этом курирование работ осуществлялось со стороны ГНЦ ИФВЭ, где в 2004–2005 гг. были проведены



Фото 10. Слева направо: генеральный директор ЦЕРН (в 2004–2008 гг.) Робер Эмар, доктор Жан-Луи Перене-Марке, лидер проекта ЛНС Лин Эванс во время экскурсии на производстве сверхпроводящих коммутирующих шин в ИЯФ СО РАН

комплексные испытания 32 систем вывода энергии из дипольных и квадрупольных магнитов коллайдера ЛНС. В 2005–2006 гг. сотрудники ГНЦ ИФВЭ провели полный монтаж всех систем в тоннеле и технических галереях коллайдера ЛНС, разработали и изготовили 19 звукозащитных кабин, устанавливаемых вокруг систем вывода энергии.

4.6. Производство вакуумного оборудования

В 1999–2007 гг. в ИЯФ СО РАН было произведено вакуумное оборудование для каналов транспортировки пучка. В общей сложности было изготовлено около десяти тысяч холодных элементов и более двух тысяч различных соединительных узлов для теплых участков прямолинейных секций коллайдера, проведен весь комплекс работ по монтажу ряда компонентов вакуумных систем (фото 11).

4.7. Электростатические дефлекторы

Для системы, позволяющей корректировать ошибки инъекции и ограничивать рост фазового объема пучка частиц (эмиттанса) в течение всего рабочего цикла ЛНС, специалисты ОИЯИ в коллаборации с ЦЕРН провели разработку и организовали производство 20 электростатических дефлекторов и 40 широкополосных усилителей, а также их сборку и установку в ЦЕРН в 2006 г. (фото 12).



Фото 11. Специалисты ИЯФ СО РАН на сборке вакуумной системы каналов транспортировки пучка



Фото 12. Электростатический дефлектор (сверху) и широкополосный усилитель

4.8. Использование электронного охлаждения в режиме ион-ионных столкновений на ЛНС

Важная роль охлаждения, т. е. сжатия поперечных и продольных составляющих встречных пучков частиц, стала ясна при практической реализации экспериментов на встречных пучках. Синхротронное излучение, мешая увеличивать энергию электронных ускорителей из-за значительных потерь энергии, одновременно существенно помогало охлаждать электроны и позитроны для первых встречных электрон-электронных и электрон-позитронных пучков. Для ионных же машин синхротронного излучения недостаточно для охлаждения пучка. Электронное охлаждение основано на взаимодействии (теплообмене) электронного пучка с сопутствующим горячим ионным пучком. Сила трения создается движением частицы в электронном газе за счет кулоновских столкновений с медленными (в сопутствующей системе) электронами. В 1966 г. Г. И. Будкером была предложена идея электронного охлаждения, которое впервые в мире было продемонстрировано в ИЯФ СО АН СССР на экспериментальной установке НАП-М в 1975 г.

С тех пор во многих мировых ускорительных центрах были созданы системы электронного охлаждения для улучшения качества ионного пучка. В большинстве из этих центров установки создавались при активном научно-техническом взаимодействии с ИЯФ СО РАН. Сотрудничество ученых ЦЕРН и Новосибирска в области электронного охлаждения началось сразу после успешных экспериментов на НАП-М. В ЦЕРН на базе кольца для «g-2» экспериментов были созданы

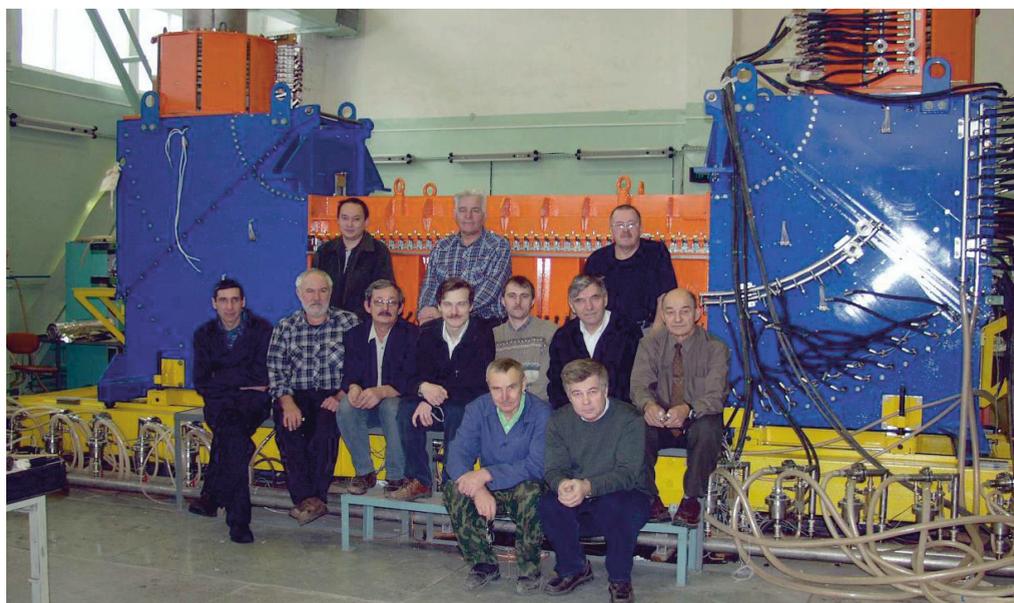


Фото 13. Установка электронного охлаждения на стенде в ИЯФ СО РАН

установки с электронным охлаждением на ускорительно-накопительных кольцах ICE (Initial Cooling Experiment), а затем и на установке LEIR (Low Energy Ion Ring), где проводились успешные эксперименты по охлаждению ионов свинца. В результате в 2004 г. в ИЯФ СО РАН была заказана установка для накопления и охлаждения тяжелых ионов свинца в накопителе LEIR, необходимых для ЛНС (фото 13). Высокое качество электронного пучка позволило накопить нужное количество ионов свинца и обеспечить высокую светимость ЛНС в режиме ионных столкновений в 2010–2011 гг.

4.9. Вклад России в ЛНС и его значимость

Стоимость Большого адронного коллайдера (не включая стоимости детекторов), как уже отмечалось выше, составила примерно 5 млрд швейцарских франков, при этом Россия выполнила работы на сумму более 150 млн швейцарских франков. Основной вклад был сделан российскими институтами ГНЦ ИФВЭ, ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ИЯФ СО РАН и ОИЯИ. Для сравнения: Министерство энергетики США направило на сооружение коллайдера ЛНС 200 млн долларов [7].

После запуска Большого адронного коллайдера в ноябре 2009 г. и получения на нем первых физических результатов в 2010 г. началась новая фаза этого глобального проекта, связанная с проведением приоритетных экспериментальных и теоретических исследований согласно физической программе ЦЕРН. Фактически именно в этой фазе произошла «материализация» тех огромных затрат, которые были произведены всеми участниками проекта, в том числе и Россией, в виде открытий новых фундаментальных закономерностей природы.

Экономическая эффективность участия России после запуска коллайдера ЛНС и выхода его на реализацию физической программы чрезвычайно высока, поскольку российские высококвалифицированные ученые и инженеры имеют доступ к уникальному дорогостоящему оборудованию, к самым современным компьютерным технологиям, используют опыт и разработки мирового уровня при минимальных затратах бюджетных средств. Безусловно, это участие будет способствовать развитию новых технологий и инновационной деятельности в России, привлечет инвестиции в российские научные организации и промышленность. Участие институтов и промышленности России и стран-участниц ОИЯИ в научной программе ЛНС становится важнейшим направлением национальных программ России.

5. Вклад России в создание детекторов на ЛНС

Вклад России в создание и развитие детекторов на ЛНС в виде материалов и оборудования по состоянию на 2013 г. равен приблизительно 44 млн 600 тыс. швейцарских франков, а также 22 млн швейцарских франков — в виде опера-

ционных расходов (техническое обслуживание и эксплуатация детекторов), обеспечивающих участие российских физиков в экспериментах на ЛHC. Затраты на содержание российских специалистов в ЦЕРН, участвующих в экспериментах на ЛHC, составили 34 млн 850 тыс. долларов США. В таблице приведены данные по ресурсам, направленным Россией на создание детекторов ЛHC. Здесь речь идет только о целевых бюджетных средствах, выделенных российским научным центрам соответствующими ведомствами, и не указаны расходы самих научных центров (в том числе на зарплату специалистов и дорожные расходы). К этому следует добавить еще более 8 млн долларов США, выделенных целевым образом на изготовление кристаллов вольфрамата свинца для детектора PHOS-ALICE на заводе «Северные кристаллы» в г. Апатиты (Россия). Что касается, например, США, то их участие в программе ЛHC осуществляется в коллаборациях ATLAS и CMS. Полный вклад США в сооружение детекторов ATLAS и CMS составил 164 и 167 млн долларов соответственно [7].

Данные по централизованным ресурсам, выделенным Россией на создание детекторов ЛHC и проведение исследований в 1997–2013 гг.

| Эксперимент/ Детектор | Оборудование и материалы, тыс. швейц. фр. | Операционные расходы (ТОЭ), тыс. швейц. фр. | Содержание персонала в ЦЕРН, тыс. долл. США |
|--------------------------|---|---|---|
| ALICE | 9 600 | 4 420 | 7 470 |
| ATLAS | 15 300 | 6 980 | 10 660 |
| CMS | 15 230 | 6 960 | 10 660 |
| ЛHCб | 4 470 | 3 640 | 6 060 |
| Итого | 44 600 | 22 000 | 34 850 |

Во многих случаях оборудование, необходимое для сооружения детекторов коллайдера ЛHC, было произведено на российских предприятиях или в научно-исследовательских институтах и университетах силами высококвалифицированных специалистов, аспирантов и даже студентов.

5.1. Детектор ATLAS

ATLAS является одним из двух основных детекторов общего назначения на Большом адронном коллайдере. Сотрудничество ATLAS включает более 2900 физиков из 194 институтов 37 стран, в число которых вошли семь российских институтов: Институт физики высоких энергий (ГНЦ ИФВЭ, Протвино), Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера (ИЯФ СО РАН, Новосибирск), Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова (ПИЯФ), Институт теоретической и экспериментальной физики (ГНЦ ИТЭФ), Московский инженерно-физический институт (МИФИ), Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН, Москва), Научно-исследовательский институт ядерной физики

им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ) и Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ).

Российский вклад в создание детектора ATLAS является одним из наиболее значимых в сотрудничестве. Он включает использование мощной промышленной и технологической базы страны и разработок ее научно-исследовательского потенциала, сосредоточенного в российских институтах — участниках эксперимента ATLAS. При создании детектора ATLAS иностранные инвестиции в предприятия России, преимущественно высокотехнологичные, составили свыше 10 млн швейцарских франков [5].

Уникальная структура магнитных полей потребовала создания детектора таких размеров, которые еще не встречались в исследованиях по физике частиц: длина установки ATLAS (рис. 4) составляет 46 м, а диаметр — 25 м. Размер детектора, расположенного под землей на глубине 100 м, соответствует высоте пятиэтажного здания.

Разработка и создание как самих составляющих детектора ATLAS, так и основных элементов инфраструктуры выполнены с определяющим участием российских научно-исследовательских и промышленных центров, на российских предприятиях и в лабораториях. Основные элементы инфраструктуры тороидальных магнитов ATLAS были разработаны совместно специалистами Сакле (Франция), ЦЕРН, ГНЦ ИФВЭ и НПО «Луч» (Подольск), где и были изготовлены. В ГНЦ ИФВЭ были подготовлены и смонтированы все высококачественные суперизоляции катушек большого сверхпроводящего тороида. В ОИЯИ изготовлена теплая структура большого сверхпроводящего тороида ATLAS. Центральная

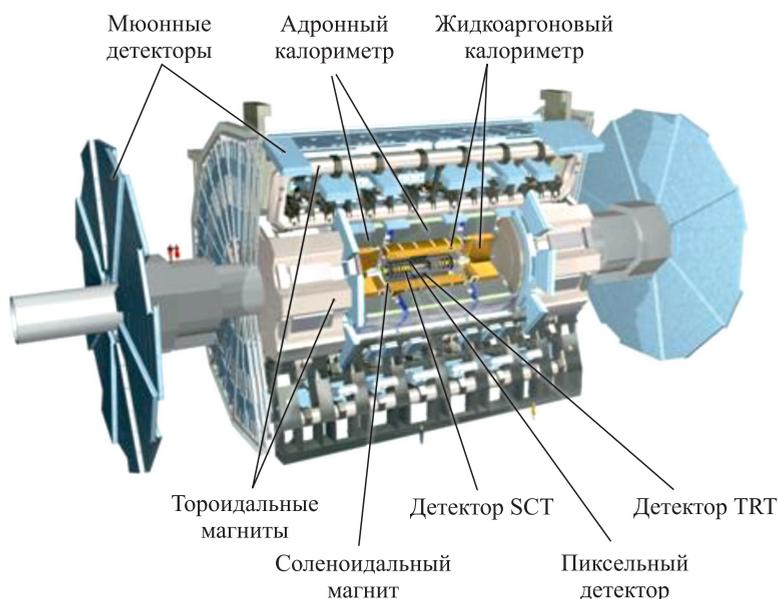


Рис. 4. Установка ATLAS



Фото 14. Монтаж базовых опор в подземном зале эксперимента ATLAS

часть установки ATLAS была смонтирована на базовых опорах, представляющих собой конструкцию из специальной стали массой 500 тонн (фото 14).

Все элементы конструкции произведены на предприятии «Ижорские заводы» (Санкт-Петербург) при участии ГНЦ ИФВЭ. В ИЯФ СО РАН была изготовлена система токоподводов для сверхпроводящих магнитов. Под руководством специалистов МИФИ и при участии ПИЯФ, а также ОИЯИ в НПО «Машиностроитель» (Пермь) для детектора были изготовлены высокотехнологичные сверхлегкие и прочные углепластиковые кольца. Полная сборка и тестирование готовых модулей детектора проводились в России и в ЦЕРН при участии российских специалистов.

Основная несущая конструкция центральной части внутреннего детектора ATLAS изготовлена в России из углепластика, обладающего рядом специальных характеристик. Подложки для кремниевого детектора выполнены из пиролитического графита и легкой керамики. В их производстве участвовали ГНЦ ИФВЭ, «Атомграф», НИИ технологии и автоматизации производства (НИИТАП, Зеленоград). Основной вклад России во внутренний детектор ATLAS состоит в разработке и создании детектора переходного излучения. В его создание большой вклад внесли МИФИ, ПИЯФ, ФИАН, НИИЯФ МГУ и ОИЯИ. Состав и чистота рабочего газа, используемого в детекторе (смесь на основе ксенона), обеспечи-

ваются циркуляционной газовой системой, в разработке и создании которой участвовали МИФИ, НИИЯФ МГУ и ФИАН.

Используя богатый опыт предыдущих работ с детекторами переходного излучения, объединенная группа МИФИ, ФИАН, ОИЯИ и ЦЕРН в 1989 г. предложила новую структуру детектора переходного излучения на основе цилиндрических пропорциональных дрейфовых камер малого диаметра (4 мм). Такая структура детектора позволяла быть наиболее эффективной при работе в условиях очень высокой светимости на ускорителе ЛНС. Стоимость проекта составила 1,5 млн долларов США. Финансирование осуществлялось Международным научно-техническим центром (МНТЦ), созданным западно-европейскими странами и США для поддержки постсоветской тяжелой промышленности в рамках программы конверсии.

Для участия в эксперименте ATLAS:

— ГНЦ ИФВЭ изготовил 256 прецизионных мюонных камер МДТ для торцевой части мюонного спектрометра;

— в ОИЯИ собрано и испытано около 65 000 дрейфовых трубок и изготовлено 84 дрейфовых камеры; для выполнения этой задачи в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ была создана автоматизированная линия для сборки и испытания дрейфовых трубок и МДТ-камер;

— в ИЯФ СО РАН изготовлена система опор торцевых мюонных детекторов — большие мюонные диски диаметром 24 м;

— в ГНЦ ИФВЭ и ПИЯФ выполнены работы по созданию вспомогательных систем мюонного детектора.

Технология массового производства сцинтиллятора для детектора ATLAS была разработана в ГНЦ ИФВЭ, где был предложен новый метод изготовления пластинчатого сцинтиллятора, ключевого элемента калориметрии, путем литья под давлением. Этот метод нашел широкое применение при создании современных экспериментальных установок. Наиболее крупным детектором такого типа является сцинтилляционный калориметр ATLAS. Чувствительный объем центрального адронного калориметра состоит из полумиллиона сцинтилляционных пластин общей массой 60 тонн. Изготовление сцинтилляторов производилось в НПО «Луч».

Поглотитель сцинтилляционного калориметра весит около 3000 тонн и является самой тяжелой частью установки ATLAS. В ГНЦ ИФВЭ изготовлено 25 % всех модулей центрального калориметра. Основной вклад в создание всей механической структуры калориметра внесен специалистами ОИЯИ.

Модуль калориметра строится из субмодулей, установленных на общем основании прямой мощной балки. Достижение высокой линейной точности установки в условиях, когда каждый модуль содержит 19 субмодулей массой около 1 т, стало возможным благодаря разработке и внедрению в ОИЯИ уникального метода лазерного контроля. Кроме достижения нужной точности, этот метод позволил

наладить высокий темп производства — два модуля в месяц. Поддержание такого темпа гарантировало выполнение международного обязательства ОИЯИ в срок.

Субмодули для модулей центральной части сцинтилляционного калориметра собирались в разных странах и институтах — в России, ОИЯИ, Чехии, Италии. Затем они доставлялись в Дубну для окончательной сборки в модули. Собранные в ОИЯИ модули автотранспортом переправлялись в ЦЕРН для сборки на месте в адронный калориметр.

В ГНЦ ИФВЭ была разработана система мониторинга сцинтилляционного калориметра радиоактивным источником с использованием гидравлического привода, позволяющая калибровать каждую из полумиллиона пластин. Ее использование позволяет значительно увеличить точность и надежность измерений калориметра.

Торцевой электромагнитный калориметр предназначен для регистрации электронов и фотонов в области больших углов. В концепцию прибора существенный вклад внесли специалисты ИЯФ СО РАН, где также была изготовлена базовая механическая структура детектора — предливневый детектор и устройство для монтажа калориметра. Все электроды торцевого калориметра были изготовлены в ФИАН, а одна секция калориметра собрана в ОИЯИ. Элементы механической структуры для второй секции изготавливались в ГНЦ ИФВЭ и НПО «Молния», сборка модулей проводилась в ГНЦ ИФВЭ.

5.2. Детектор CMS

Детектор CMS, как и ATLAS, является одним из двух основных детекторов общего назначения на Большом адронном коллайдере. Сотрудничество CMS включает более 2500 физиков из 183 институтов 40 стран, в число которых вошли российские институты: Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), ГНЦ ИФВЭ, ПИЯФ и ГНЦ ИТЭФ Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ФИАН, НИИЯФ МГУ, а также ОИЯИ [13].

Главные особенности конструкции CMS заключаются в использовании соленоида с сильным магнитным полем, внутреннего трекера с кремниевыми детекторами, гомогенного электромагнитного калориметра на основе сцинтиллирующих тяжелых кристаллов (рис. 5).

Встречные пучки протонов направлены по оси соленоида, а его центр выбран в месте встречи пучков — точке взаимодействия, локализованной с точностью до десятков микрометров.

Участие RDMS в создании детектора CMS. Организация сотрудничества RDMS (от англ. Russia and Dubna Member States), объединяющего усилия многих институтов и научных школ, позволила физикам России и государств-членов ОИЯИ принять активное участие в создании отдельных узлов и элементов комплекса CMS, в том числе нести полную ответственность за создание и монтаж торцевой области детектора CMS — торцевых адронных калориметров и перед-

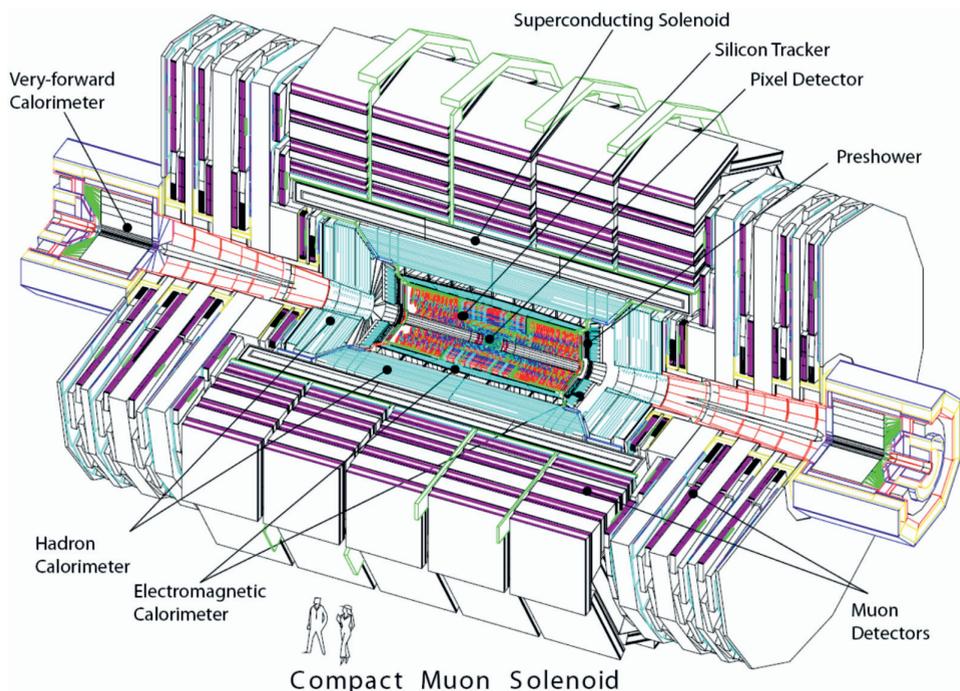


Рис. 5. Схема экспериментального комплекса CMS. Общая масса установки — 14 500 т, внешний диаметр — 14,60 м, длина — 21,60 м, магнитное поле соленоида — 4 Тл

них мюонных станций (ME1/1). В кооперации с другими странами, входящими в коллаборацию CMS, — участвовать в подпроектах предливневых детекторов, торцевых электромагнитных калориметров, торцевой мюонной системы (ME), передних адронных калориметров и комплекса вращающейся передней радиационной защиты, в разработке программы физических исследований, реконструкции и отборе событий, в создании базового математического обеспечения и компьютерного сопровождения.

Группы ученых из ОИЯИ, ГНЦ ИФВЭ, НИКИЭТ (Москва), Национального центра физики частиц и высоких энергий (НЦ ФЧВЭ, Минск), Харьковского физико-технического института (ХФТИ) и Института монокристаллов (ИМ, Харьков) при разработке и создании торцевых адронных калориметров работали в тесном сотрудничестве с американскими специалистами. Концепция калориметра, основанная на светосборе с помощью спектросмешивающего волокна, встроенного в пластины (тайлы) сцинтилляционного калориметра, прослоенные латунным поглотителем, была предложена учеными ГНЦ ИФВЭ. Работа по созданию торцевых адронных калориметров CMS проведена с широким привлечением промышленности России. На фото 15 представлен фрагмент стыковки торцевой системы детекторов в подземном экспериментальном зале CMS с цилиндрической системой при подготовке к включению магнита.

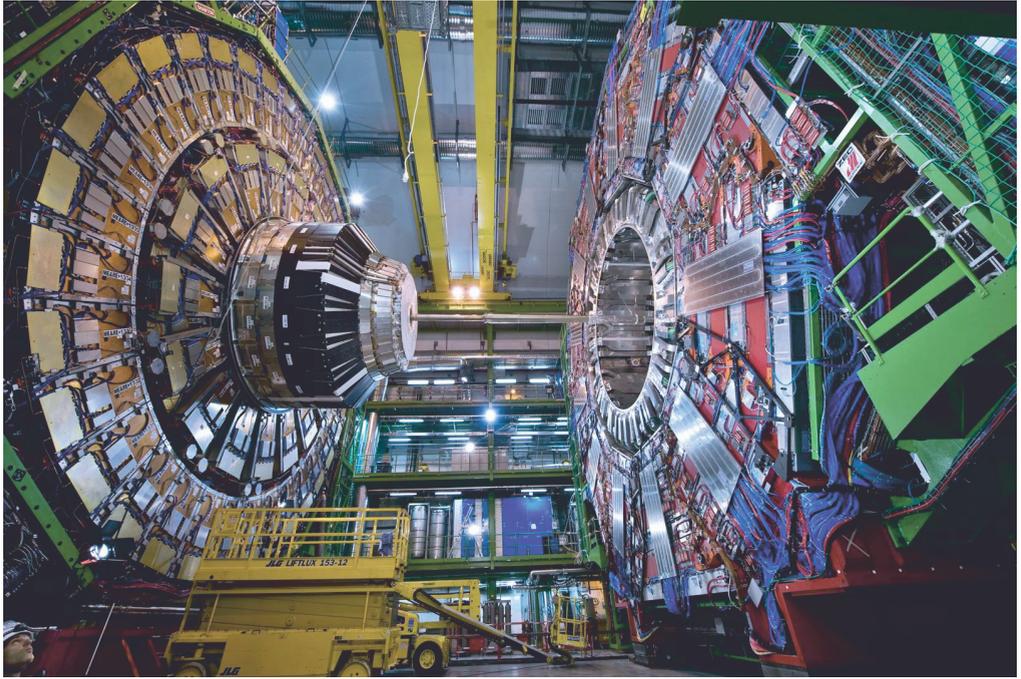


Фото 15. Торцевая система детекторов (слева) в подземном экспериментальном зале CMS во время стыковки установки с цилиндрической системой (справа) при подготовке к включению магнита. Сентябрь 2008 г.

Высокопрочный материал для изготовления поглотителя калориметров выплавлен из оружейной латуни артиллерийских гильз на заводе «Красный выборжец» в Санкт-Петербурге. Высокоточное изготовление секторов поглотителя, элементов интерфейса и предварительная сборка проведены на Минском заводе им. Октябрьской Революции. Организацию поставок, сопровождение изготовления поглотителя и технический контроль качества на всех этапах обеспечивали специалисты из НИКИЭТ. Сцинтилляционные пластины из материалов, поставленных коллаборацией, изготовлены в ИМ при участии группы специалистов из ХФТИ. Изготовление, сборка и тестирование оптических элементов (мегатайлов) проведены в ГНЦ ИФВЭ.

Монтаж торцевых калориметров в наземном экспериментальном зале CMS проводился по технологии, разработанной специалистами RDMS. Физиками ГНЦ ИТЭФ был предложен новый тип радиационно стойкого калориметра, основанный на регистрации черенковского света в кварцевом волокне, внедренном в стальной поглотитель. Совместно с Российским федеральным ядерным центром Всероссийским научно-исследовательским институтом технической физики (РФЯЦ ВНИИТФ, Снежинск) была разработана оригинальная технология изготовления секторов поглотителя. Специалисты ОИЯИ, институтов Белоруссии и

Болгарии обеспечили разработку и создание передних мюонных станций ME1/1, серийное изготовление которых проводилось в ОИЯИ на специально оборудованном технологическом участке.

Для торцевой мюонной системы физиками ОИЯИ была предложена методика проволочных газовых камер с катодным считыванием. Впервые большая катодная камера размером $3 \times 1,5$ м была разработана в Дубне в рамках методической программы развития первого совместного ОИЯИ–ЦЕРН эксперимента NA-4 в 1979 г. Однако широкое применение методики в то время было ограничено большим количеством каналов прецизионной аналоговой электроники. Прогресс в развитии технологии микросхем, достигнутый в последние десятилетия, открыл реальную возможность использования этой перспективной методики в современном эксперименте.

За время многолетних методических исследований в ОИЯИ, ПИЯФ и ЦЕРН изучены эффекты влияния сильного магнитного поля на пространственное разрешение и способы их компенсации.

Группа физиков и инженеров ПИЯФ в сотрудничестве с американскими институтами приняла участие в создании торцевой мюонной системы. Основной вклад коллектива ПИЯФ в эксперимент заключается в изготовлении камер ME2, 3, 4/1 торцевой мюонной системы.

Электромагнитный калориметр нового типа на основе сцинтиллирующих кристаллов вольфрамата свинца, предложенный российскими физиками из ГНЦ ИФВЭ совместно с учеными из Института ядерных проблем Белорусского государственного университета (ИЯП БГУ), — самый точный прибор для измерения энергий фотонов и электронов. В сотрудничестве с ЦЕРН и научными центрами России, после пяти лет научно-методических исследований по программе тяжелых сцинтиллирующих кристаллов вольфрамата свинца, на Богородицком заводе технохимических изделий (Богородицк, Россия) была разработана уникальная технология изготовления лучших в мире кристаллов с характеристиками, соответствующими специфике эксперимента, включая радиационную стойкость. В результате выигранного международного тендера на заводе в г. Богородицке был размещен заказ на изготовление около 80 тысяч кристаллов. Система для контроля серийных кристаллов была разработана учеными RDMS и поставлена в ЦЕРН. В то же время в рамках RDMS продолжаются исследования фундаментальных свойств кристаллов и их применения в других областях науки и техники.

Для расположения кристаллов в калориметре специалистами ОКБ им. В. М. Мясищева (Жуковский) совместно с физиками ИЯИ РАН разработаны прецизионные тонкостенные многоячеистые механические структуры — альвеолы на основе углеродной волоконной технологии. Завершено серийное производство около 600 таких структур для торцевой части калориметра. Для регистрации света, выделяемого в кристаллах, в ЦНИИ «Электрон» (Санкт-Петербург) совместно с физиками ПИЯФ разработаны фотоприемники — вакуумные фототриоды для работы в сильном магнитном поле. Серийное изготовление 15 ты-

сяч вакуумных фототриодов было организовано и успешно завершено в ЦНИИ «Электрон». Группой физиков RDMS совместно с Ракетно-космической корпорацией «Энергия» разработаны и изготовлены термозкраны для обоих калориметров. В кооперации с российской промышленностью созданы модераторы для электромагнитных калориметров. При активном участии специалистов ГНЦ ИФВЭ и ИЯИ РАН в ЦЕРН создана экспериментально-методическая база и успешно завершена комплексная сборка «супермодулей», содержащих матрицу из 25 кристаллов торцевых калориметров. Электромагнитные калориметры были собраны, проверены и размещены в подземном экспериментальном зале CMS.

ОИЯИ совместно с институтами Армении и Белоруссии участвовал в подпроекте по созданию предливневого детектора SE торцевого электромагнитного калориметра. На основе так называемой кремниевой программы, инициированной ОИЯИ более десяти лет назад, в сотрудничестве с ОИЯИ и ЦЕРН в Научно-исследовательском институте материаловедения (Зеленоград) была разработана передовая в мире технология изготовления радиационно стойких кремниевых координатных детекторов для предливневого детектора. Серийное изготовление около двух тысяч кремниевых стриповых детекторов было организовано в г. Зеленограде в кооперации с ОИЯИ и ЦЕРН.

При участии специалистов ГНЦ ИТЭФ в РФЯЦ-ВНИИТФ (Снежинск) освоена технология диффузионной сварки профилированных стальных пластин в монолитные блоки. Было разработано специальное технологическое оборудование, позволяющее сваривать блоки массой до 750 кг. В результате изготовлено и поставлено в ЦЕРН 36 секторов поглотителя передних калориметров для детектора CMS.

Эксперименты на коллайдерах нового поколения проводятся в условиях жесткого радиационного фона. При проектной светимости LHC рождается около 10^{11} вторичных частиц в секунду. Специалистами ГНЦ ИФВЭ совместно с ЦЕРН были проведены исследования и моделирование радиационного фона, разработана и оптимизирована радиационная защита различных детекторов. Для подавления этого фона специалистами ГНЦ ИФВЭ совместно с ЦЕРН спроектирован и создан комплекс передней радиационной защиты в области интерфейса пучкового канала и экспериментального зала. В основу концепции, с учетом ограниченности пространства, положена конструкция-трансформер. Изготовление системы осуществлялось на Савёловском машиностроительном заводе (Савёлово, Россия), а ее контрольная сборка и доводка — в ГНЦ ИФВЭ.

5.3. Детектор ALICE

Эксперимент ALICE — единственный эксперимент на Большом адронном коллайдере, специально разработанный для исследований столкновений тяжелых ядер и тяжелых ионов. Главная научная цель эксперимента — всесторон-

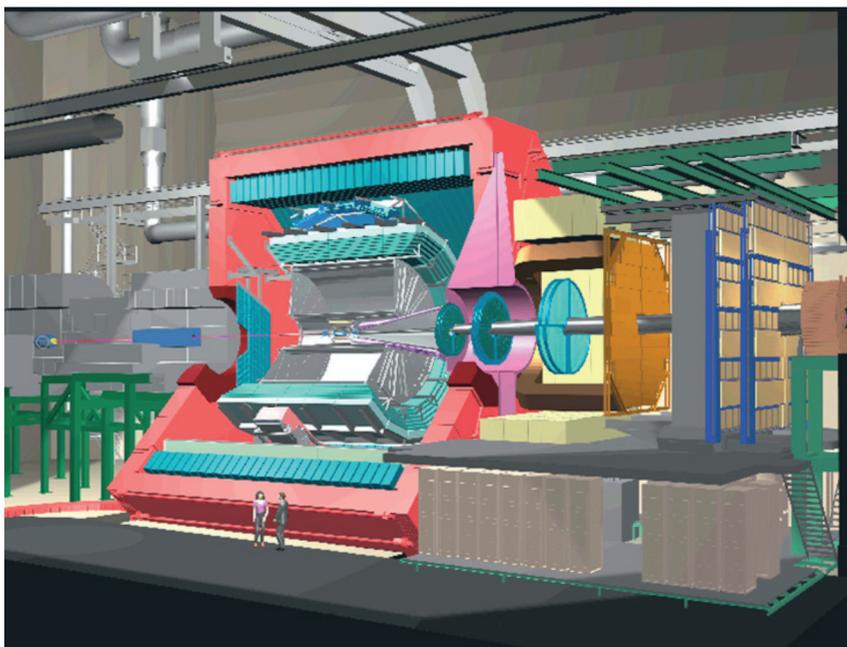


Рис. 6. Масштабный разрез установки ALICE

ние исследования свойств и процессов образования, развития и эволюции кварк-глюонной материи. На рис. 6 представлен масштабный разрез детектора ALICE.

Всего в эксперименте ALICE участвуют более 1000 ученых из более чем 70 институтов, представляющих более 30 стран. Международная коллаборация ALICE представлена научными центрами России: ГНЦ ИТЭФ, ГНЦ ИФВЭ и ПИЯФ Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ИЯИ РАН, МИФИ, ИЯФ СО РАН, СПбГУ, а также ОИЯИ. Координация всех работ в эксперименте ALICE от Российской Федерации осуществляется Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт». Россия внесла весомый интеллектуальный и материальный вклад в разработку и создание экспериментальной установки ALICE. Один из ее крупных ключевых детекторов — прецизионный фотонный спектрометр PHOS — разработан и создан в рамках международного проекта ALICE/PHOS, в котором участвует 14 институтов из 8 стран, а также НИЦ «Курчатовский институт» при активном участии ГНЦ ИФВЭ, Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров) и ОИЯИ. Спектрометр PHOS основан на разработанных и производимых в России кристаллах вольфрамата свинца. Он предназначен для проведения экспериментов по физике фотонов и нейтральных мезонов.

Российские институты и ОИЯИ сыграли важную роль в разработке и создании димьюонного спектрометра (ПИЯФ, ОИЯИ, РФЯЦ-ВНИИЭФ), внутреннего трекера (СПбГУ), времяпролетного идентификатора (ГНЦ ИТЭФ), триггерного детектора T0 (ИЯИ РАН, МИФИ, НИЦ «Курчатовский институт», ИЯФ СО РАН).

В 2000–2001 гг. большие усилия были затрачены на решение возникшей в 1999 г. проблемы обеспечения технической возможности массового производства кристаллов вольфрамата свинца для эксперимента ALICE. Во второй половине 1999 г. НИЦ «Курчатовский институт» начал работы по созданию технологии и организации промышленного производства кристаллов вольфрамата свинца (PWO) на построенном в самом конце 1980-х гг., но практически ранее никогда не работавшем заводе в г. Апатиты Мурманской обл. Начальной основой для работ по созданию промышленной технологии производства кристаллов PWO послужили результаты научных исследований, проводившихся в 1992–1995 гг. совместно учеными Курчатовского института и специалистами ИМ в Харькове. Разрабатывались и совершенствовались методики сертификации. В результате на заводе в г. Апатиты была успешно создана промышленная технология производства высококачественных кристаллов вольфрамата свинца для эксперимента ALICE и в 2002 г. первая партия кристаллов была поставлена в ЦЕРН (фото 16).

Значительный вклад в разработку и создание мюонного спектрометра внесли ПИЯФ, РФЯЦ-ВНИИЭФ и ОИЯИ. В рамках мюонного проекта учеными и специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ были выполнены концептуальный, а затем и



Фото 16. Первая партия кристаллов вольфрамата свинца для эксперимента ALICE прибыла в ЦЕРН

детальный инженерный проекты переднего и малоуглового поглотителей (абсорберов), представляющих собой сложные многокомпонентные системы. При этом инженерные разработки велись на основе оперативных результатов компьютерных модельных расчетов характеристик этих экранирующих систем, выполнявшихся физиками РФЯЦ-ВНИИЭФ параллельно с разработками инженеров-конструкторов. Такое взаимодействие физиков и инженеров давало возможность, с одной стороны, проверить реализуемость предлагавшихся физиками принципиальных изменений компоновки и материалов, а с другой стороны, проверить, насколько предлагаемые инженерные решения позволяли обеспечить требуемые характеристики (уровень фона на трековых камерах). Узлы разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ переднего и малоуглового поглотителей были изготовлены на различных промышленных предприятиях Китая, Европы, Армении и Индии. Сборка абсорберов была осуществлена в ЦЕРН специалистами из Сарова.

Проект дипольного магнита мюонного спектрометра был разработан в ОИЯИ, а ярмо магнита было изготовлено на Машиностроительном заводе в г. Савёлово (фото 17). Специалисты из ОИЯИ выполнили все работы по сборке магнита в ЦЕРН.



Фото 17. Ярмо магнита димюонного спектрометра. Спроектировано в ОИЯИ

Весомый интеллектуальный и материальный вклад в разработку и изготовление мюонных трековых камер внес ПИЯФ, где на организованном производственном участке было изготовлено 42 модуля трековых камер (25% от полного количества) для станций 3, 4, 5 мюонного спектрометра детектора ALICE.

Российские институты — МИФИ, ИЯИ РАН и НИЦ «Курчатовский институт» — сыграли ведущую роль в разработке детектора T0, который определяет момент времени столкновения встречных ускоренных частиц с точностью, превышающей 50 пикосекунд.

При координирующей роли СПбГУ был выполнен обширный комплекс работ по проекту внутренней трековой системы ALICE — Inner Tracking System (ITS). Решение проблемы по созданию радиационно прозрачной, высокостабильной и сверхлегкой системы ITS было обеспечено в Санкт-Петербурге на основе системного подхода при тесном взаимодействии специалистов СПбГУ, Центрального конструкторского бюро машиностроения (ЦКБМ), НПО «Авангард» и Института метрологии им. Д. И. Менделеева.

В проекте времяпролетного идентификатора TOF активное участие принимали специалисты ГНЦ ИТЭФ, где для испытаний и предварительной калибровки модулей был разработан и создан специальный космический стенд, установленный в ЦЕРН.

Для проведения модернизации полюсов магнита L3 специалисты ГНЦ ИТЭФ разработали конструкцию и подготовили проектно-конструкторскую документацию по изготовлению вставок, включая грузозахватные приспособления для вращения, перемещения и монтажа дополнительных полюсов-вставок. После изготовления грузозахватных приспособлений они были испытаны на прочность по методике, разработанной в ГНЦ ИТЭФ, на заводе-изготовителе. Изготовителем четырех дополнительных полюсов-вставок и грузозахватных приспособлений стал завод ОАО «Опытный завод Гидромонтаж» (пос. Селятино, Московская обл.).

Россия полностью выполнила свои обязательства по вкладу в так называемые общие проекты, в которых размер российских вложений составил 1 млн 310 тыс. швейцарских франков. В зачет этого вклада был принят большой объем работ по разработке и созданию инфраструктуры эксперимента ALICE, выполненных российскими специалистами. Полный материальный вклад России в эксперимент ALICE составил 17 млн 490 тыс. швейцарских франков [5].

5.4. Детектор LHCb

Цель эксперимента LHCb — наиболее точно изучить свойства *B*- и анти-*B*-мезонов. Детектор LHCb — специализированный прибор, сконструированный с этой единственной целью. Поэтому он менее сложен, чем большие многоцелевые детекторы ускорителя LHC, такие как ATLAS и CMS.

В сооружении детектора LHCb (фото 18) принимали участие более 700 физиков и специалистов из 50 институтов в 15 странах мира. Участие России в про-

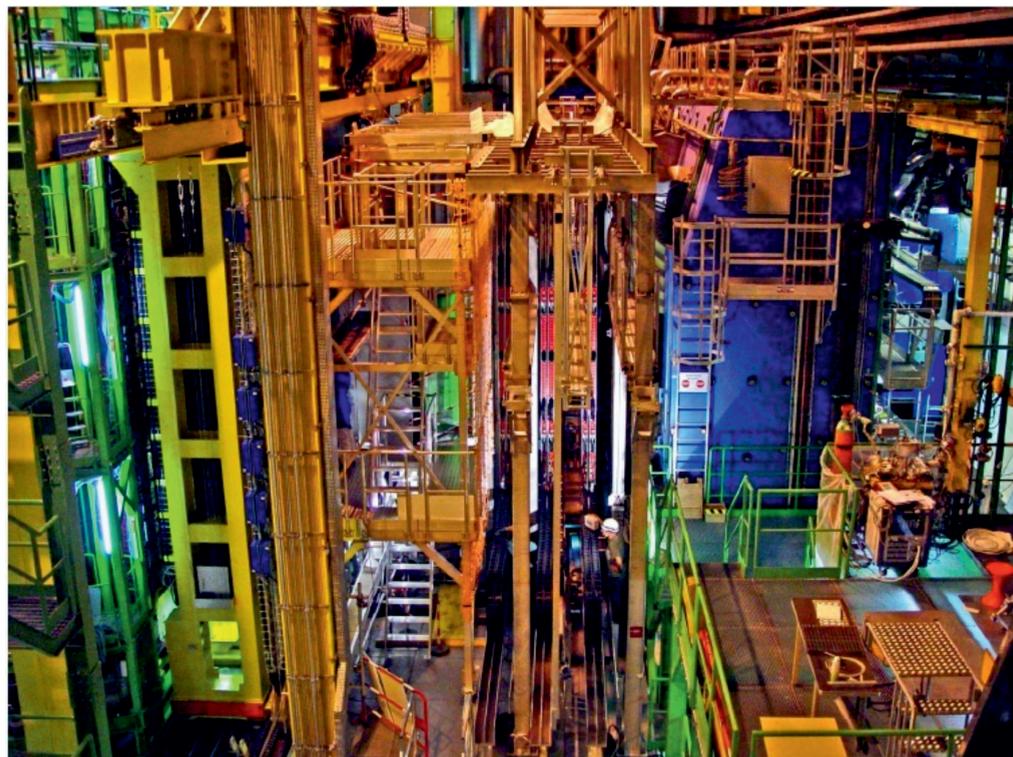


Фото 18. Внешний вид установки LHCb

екте LHCb — важнейшая часть национальной научной программы в области исследований фундаментальных свойств материи. Российские физики принимали активное участие не только в создании детекторов для эксперимента LHCb, но и в разработке программного обеспечения и программ физических исследований. В эксперименте LHCb принимают участие 65 физиков из шести российских институтов: ПИЯФ, ГНЦ ИТЭФ и ГНЦ ИФВЭ Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ИЯФ СО РАН, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ.

Технологии массового производства модулей электромагнитного калориметра и сцинтилляторов для детектора LHCb были разработаны в ГНЦ ИТЭФ и в ГНЦ ИФВЭ соответственно, а их изготовление производилось в НПО «Полимерсинтез» (Владимир), в НПО «Луч» (Подольск) и РФЯЦ-ВНИИЭФ. Изготовление стальных пластин осуществлялось с участием специалистов из НПО «Штамп» (Тула). Модули электромагнитного и адронного калориметров были полностью собраны в России.

Специалисты из ПИЯФ предложили использовать специально разработанные быстродействующие мюонные камеры, число которых в системе LHCb в целом составляет 1380 единиц, 600 из которых были собраны в ПИЯФ.

Российский вклад в создание детектора LHCb является существенным: он включает использование мощной промышленной и технологической базы страны и разработок ее научно-исследовательского потенциала, сосредоточенного в российских институтах — участниках эксперимента LHCb. При создании детектора LHCb иностранные инвестиции в предприятия России, преимущественно высокотехнологичные, составили свыше 11,5 млн швейцарских франков [5].

Завершая краткий обзор участия России в подготовке детекторов на LHC, подчеркнем, что в рамках проектов ATLAS, CMS, ALICE и LHCb в российских институтах и в промышленности были разработаны новые экспериментальные методы, созданы новые производственные участки, освоены новые технологии. Участие в этих проектах способствовало повышению культуры производственной и научной деятельности на многих российских предприятиях (технологии проектирования, сопровождение проектов, методы инженерных расчетов, информационные и вычислительные технологии).

Многие разработки, выполненные при реализации проекта Большого адронного коллайдера, находят практическое применение. Например, новые технологии и методы по вводу мощности при большом градиенте температур, работы по суперизоляция, выполненные в ГНЦ ИФВЭ, позволяют приступить к созданию сверхпроводящих индукционных накопителей для энергетики. Другая разработка ГНЦ ИФВЭ, связанная с созданием прецизионных мюонных камер установки ATLAS, используется в разработках систем антитеррора.

Таким образом, фундаментальные исследования важны не только своими научными результатами, но и сопровождающими их новыми технологическими и инновационными эффектами, так как при работе на грани возможного фундаментальная физика предъявляет высокие требования к промышленности, что, в свою очередь, является локомотивом для ее развития.

6. О модернизации LHC

Как отмечалось выше, Россия внесла значительный вклад в создание LHC с самого начала реализации этого глобального проекта преимущественно так называемым инструментальным путем, а также оказала финансовую поддержку российским специалистам, принявшим участие в работах по сооружению коллайдера. На современном этапе участие России в этой программе сфокусировано на разработках и исследованиях в связи с запланированным проведением модернизации LHC, направленной, в частности, на повышение светимости пучка протонов, начиная с 2022 г.

Ключевой проблемой этой модернизации является уменьшение поперечного размера пучка частиц примерно в 4 раза. Одним из способов достижения этой цели является замена существующих NbTi сверхпроводящих квадрупольных магнитов на магниты с большей апертурой на основе сверхпроводников следую-

щего поколения Nb_3Sn [7]. К другим задачам относятся решение вопросов по стабильности и устойчивости пучка частиц, устранение механизмов и причин, вызывающих срыв пучка, и т. п. Решение этих проблем безусловно повлияет на успешную разработку новых протонных ускорителей в будущем.

Финансовая поддержка программы модернизации LHC со стороны России обеспечит дальнейшее развитие соответствующей технологии, где Россия является одним из лидеров в мире. Это сохранит и укрепит наши лидирующие позиции как в плане вклада в глобальную международную программу по модернизации LHC с высокой светимостью, так и в плане повышения собственных ресурсов для отечественных ускорительных программ в будущем.

7. Об участии России в проекте ILC

Наряду с глобальным проектом LHC программа по исследованию и развитию проекта международного линейного коллайдера (R&D ILC) является отличной площадкой, где российские ключевые технологии и научный потенциал могли бы играть одну из главных ролей в рамках международной коллаборации.

Линейные ускорители устроены таким образом, что пучки частиц ускоряются в прямолинейном направлении. Вообще говоря, чем длиннее рабочая часть ускорителя, тем большая энергия частиц может быть достигнута. В настоящее время самым протяженным в мире является действующий линейный ускоритель электронов в Национальной ускорительной лаборатории SLAC (США), его длина около 3,2 км.

Реализация программы R&D ILC с предполагаемой длиной несколько десятков километров началась в 2007 г. на основе решения Международного комитета по будущим ускорителям (ICFA) о том, что следующее поколение линейных электрон-позитронных коллайдеров будет основано на сверхпроводящей радиочастотной технологии (SRF). Эта программа была разработана под руководством так называемого Глобального конструкторского совета (GDE), объединяющего участников проекта ILC в Азии, Европе и Америке. Принципиальный технологический посыл заключается в том, чтобы продемонстрировать возможность получения высокого градиента ускорения частиц величиной в 35 МВ/м, что находится за пределами современных достижений ускорительной науки [7].

Технология SRF была впервые разработана в Корнеллском университете и Национальной ускорительной лаборатории им. Джефферсона (JLab) в США [7]. Позднее центр по тематике SRF переместился в Германию (лаборатория DESY в Гамбурге), где эта технология получила дальнейшее развитие с применением ее в программе TESLA. В настоящее время сверхпроводящая радиочастотная технология используется в X-лучевых источниках NSLS и ALS и уже включена в программу по сооружению нового X-источника для лазера на свободных электронах. Программа SRF-технологии обеспечивает возможность модернизации электрон-

ного ускорителя CEBAF в JLab с энергией электронов 12 ГэВ, а также формирует основу для базового комплекса Project X в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США), где будут ускоряться высокоинтенсивные пучки протонов с энергией 8 ГэВ [7].

Комитет GDE организовал специальную международную группу по программе R&D ILC, где на ежемесячных заседаниях происходит обсуждение и проводятся экспертизы подготовленного материала по проекту ILC.

Россия с самого начала принимала активное участие в подготовке проекта ILC силами ученых и специалистов национальных научно-исследовательских институтов и ОИЯИ. Более того, Россия была утверждена одной из четырех стран, наряду с США, Японией и Швейцарией, которой была оказана честь участвовать в конкурсе на право разместить коллайдер ILC на своей территории в окрестностях г. Дубны Московской обл. под эгидой ОИЯИ.

В конце 2013 г. была завершена подготовка Технического проекта ILC (TDR & Review), и в настоящее время решаются вопросы по месторасположению коллайдера. Начало сооружения установки намечено на 2016 г. с завершением работ к 2023 г., что позволит спустя год начать набор данных по результатам столкновения электронов с позитронами. Ориентировочная стоимость коллайдера ILC на энергию 500 ГэВ составляет около 8 млрд долларов (в среднемировых ценах

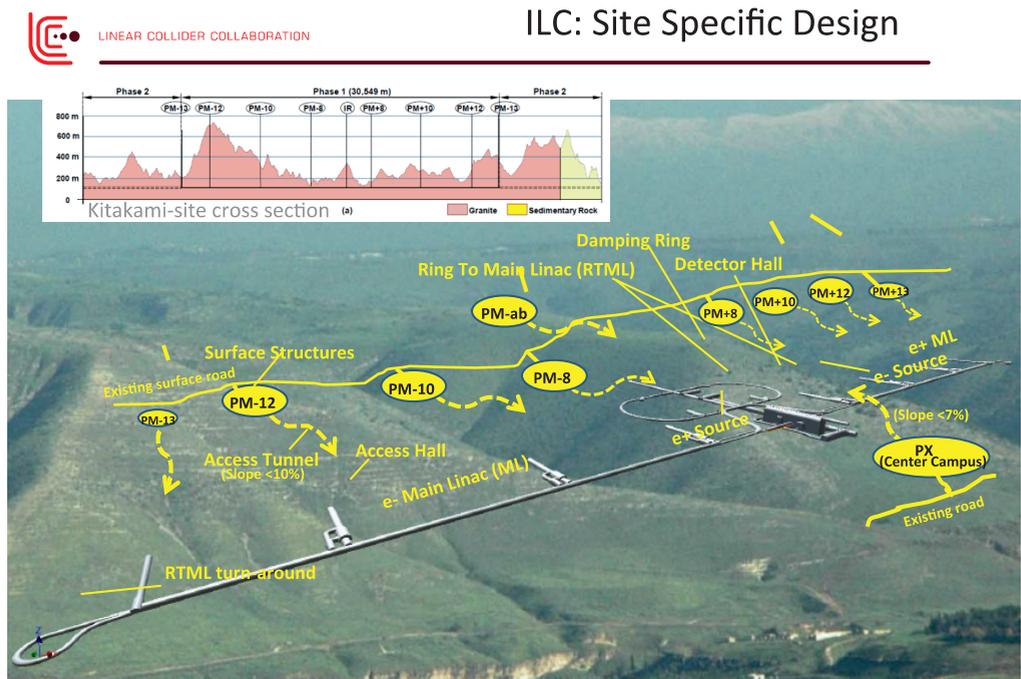


Рис. 7. Схема размещения коллайдера ILC в окрестностях города Китаками (префектура Иватэ, Япония)

2013 г.), из которых, как ожидается, половину обеспечит страна, принимающая на себя обязательства по расположению коллайдера, — Япония. На рис. 7 показана предварительная схема расположения коллайдера ILC в окрестностях города Китаками (префектура Иватэ, Япония) с общей длиной рабочих участков коллайдера 31 км [14].

В настоящее время бюджет ЦЕРН составляет около 1,2 млрд швейцарских франков, что почти в 10 раз больше, чем бюджет ОИЯИ, и почти в 2 раза превышает сумму, выделяемую Министерством энергетики США на развитие ФЧ. В ведущих странах Азии происходит наращивание инвестиций в программу по созданию ускорителей на высокие энергии, в том числе и в рамках международных консорциумов. Прежде всего это относится к Японии, которая добилась права размещения на своей территории коллайдера ILC.

Участие российских институтов и ОИЯИ в международной программе R&D ILC позволит обновить программу «домашних» разработок по физике и технике электрон-позитронных коллайдеров, где отечественная ускорительная школа является лидирующей в мире. Далее можно ожидать, что через несколько лет основные технологические разработки, например, по сверхпроводящим резонаторам, могут быть переданы в том числе в российскую промышленность наряду с уже включившимися в эту работу США и Японией. Отметим, что в США производство резонаторов осуществляется в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми, Аргоннской национальной лаборатории, Национальной ускорительной лаборатории им. Джефферсона и в Корнеллском университете. Развитие программы по совершенствованию сверхпроводящей радиочастотной технологии в России является чрезвычайно перспективным и потребует развертывания производства резонаторов и подготовки тестовых установок, например, для вертикального тестирования резонаторов и горизонтального тестирования криомодулей.

8. О МОЛОДЫХ

Более полутысячи российских ученых, тех, кто участвовал в последние годы в экспериментах на коллайдере Tevatron (FNAL), кто строил LHC, принимал участие в обработке полученных с детекторов физических данных и их анализе, — в основном являлись сотрудниками институтов РАН, других институтов и университетов России, а также ОИЯИ. Значительную часть из них составляют молодые специалисты или аспиранты, для которых работа в составе коллабораций является важной составляющей повышения научной квалификации и карьерного роста в науке.

Большое значение для вовлечения молодых российских ученых, аспирантов и студентов в «большую науку» имеют регулярные тематические семинары, проводимые в научных центрах и университетах на территории страны. К счастью,

в XXI в. мы имеем такие коммуникационные возможности, которые позволяют осуществлять прямые и одновременные контакты между коллегами, находящимися на значительных расстояниях друг от друга. Так, например, тематический семинар «Физика на LHC», организованный в 2010 г. в ОИЯИ на базе коллаборации RDMS CMS, ежемесячно собирает научную и студенческую аудиторию во много сотен человек благодаря видеотрансляции семинара, доступной во многих научных институтах и университетах России, а также в ЦЕРН.

Определенная часть молодых людей по завершении работы в составе международного коллектива продолжит научную карьеру в области физики частиц, нередко совмещая ее с преподавательской деятельностью. Остальные, не получив «позиции» в научном сегменте страны (в том числе и не пожелавшие ее иметь), перейдут в промышленность или другие сферы бизнеса, даже имея при этом ученую степень кандидата наук. В конечном счете для российской промышленности, системы образования и бизнеса является чрезвычайно важным и полезным получить новых высококвалифицированных специалистов, прошедших хорошую «школу» в международных научных коллаборациях.

Усиление позиции российского ускорительного сообщества в международных проектах, и особенно в тех, которые направлены на создание пучков частиц с максимально возможной энергией, прямым образом отражается на улучшении подготовки студентов в этой области науки и техники, которая останется доминирующей и в будущем. Обновление (омоложение) ускорительного сообщества через такую целенаправленную подготовку студентов является необходимым шагом на пути, когда российские «домашние» ускорительные программы будут оказывать неопределимую помощь и поддержку многим другим областям науки, обеспечивая их гармоничное развитие на многие годы.

Заключение

Активное участие в ускорительных международных коллаборациях позволяет России получить выгоды для отечественных ускорительных программ по трем направлениям: в возможности развития и получения важных технических и инновационных ресурсов, в технологическом разделении труда и в обмене его результатами между странами-партнерами по коллаборации, в вовлечении в этот процесс молодых отечественных ученых и специалистов. Первые два из этих направлений требуют проведения тестовых испытаний пучков частиц и изготовления специализированных уникальных инструментов для производства отдельных элементов и узлов ускорителя. Международное партнерство обеспечивает распределение этих работ по различным регионам, тем самым исключая дублирование в концентрации усилий, а также активизирует мотивацию каждой страны или участника развивать собственный комплекс ресурсов в плане выполнения своих обязательств перед коллаборацией.

Поистине знаковым является 1990-й год, когда проблема коммуникаций в международных масштабах в области физики частиц привела к возникновению World-Wide-Web. Несмотря на это, российские физики, как и их коллеги из других стран, возглавляющие группы ученых по конкретным направлениям в международных коллаборациях, вынуждены периодически находиться в поездках для непосредственного участия в экспериментах, пересекая для этого Атлантический и Тихий океаны или 3–6 часовых поясов в Европе. Однако затраты на дорогу, которые зачастую покрываются за счет «домашнего» института, не могут сравниться с теми интеллектуальными ресурсами и научным потенциалом, которые получает страна от участия в международной экспериментальной коллаборации.

Очевидно, что результаты глобального международного сотрудничества в области физики и техники ускорителей, физики частиц и физики высоких энергий будут активно востребованы и использоваться в России для развития научных исследований и высоких технологий во многих приоритетных направлениях в силу их масштабности и универсальности.

Благодарности

Авторы благодарны за предоставленную возможность использовать архивные и открытые нормативные документы и фотоматериалы министерств и ведомств России, участвующих в проектах «большой науки» по физике частиц и высоких энергий, соответствующих институтов и промышленных предприятий, институтов Российской академии наук, Объединенного института ядерных исследований, Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Европейской организации ядерных исследований ЦЕРН, Министерства энергетики США, Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США), Организации по изучению высокоэнергетических ускорителей КЕК (Япония) и др.

Список литературы

1. First observations of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson at the LHC, www.elsevier.com/locate/physletb.
2. *ATLAS Collab.* // *Phys. Lett. B.* 2012. V. 716. P. 1.
3. *CMS Collab.* // *Ibid.* P. 30.
4. *Матвеев В. А., Сисакян А. Н., Скринский А. Н.* Большой адронный коллайдер — новый шаг к познанию глубины материи. Вклад физиков России в крупнейший международный проект на рубеже XX и XXI веков // *Вестник РАН.* 2010. Т. 80. С. 204.
5. *Россия в ЦЕРН: Участие научных организаций и промышленных предприятий Российской Федерации в создании Большого адронного коллайдера.* Дубна: ОИЯИ, 2013.

6. *Unnervik A.* The construction of the LHC. Lessons in Big Science Management and Contracting // *The Large Hadron Collider: A Marvel of Technology* / Ed. by L. Evans. EFPL Press, Boca Raton, FL, 2009. P. 40.
7. *Anderson J. et al.* Benefits to the U.S. from Physicists Working at Accelerators Overseas. arXiv: 1312.4884 [physics.soc-ph].
8. Программа фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 декабря 2012 г., № 2237-р.
9. Государственная программа Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 гг. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 декабря 2012 г., № 2433-р.
10. *Heuer R.* The European Strategy for Particle Physics and CERN // P5 Face-to-Face Meeting #1, Fermilab, 2–4 Nov. 2013.
11. The European Strategy for Particle Physics. CERN, 24 July 2006.
12. Accelerators for Americas Future. U.S. Department of Energy, 2010. P. 5.
13. В глубь материи. Физика XXI века глазами создателей экспериментального комплекса на Большом адронном коллайдере в Женеве. М.: Этерна, 2009.
14. *Suzuki A.* Strategic Planning for the Japanese Program // P5 Face-to-Face Meeting #1, Fermilab, 2–4 Nov. 2013.

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| 1. Ведущая роль России в фундаментальной физике | 6 |
| 1.1. Масштабы «большой науки» | 6 |
| 1.2. Как организованы проекты «большой науки» | 15 |
| 1.3. Разделение международной ответственности за большие проекты | 16 |
| 2. Физика частиц и инновации | 18 |
| 3. Вклады и бонусы от участия в ускорительных коллаборациях в выездных (зарубежных) проектах | 19 |
| 4. Участие России в создании коллайдера LHC | 20 |
| 4.1. Резистивные магниты | 22 |
| 4.2. Дипольные и квадрупольные магниты | 23 |
| 4.3. Септум-магниты системы инжекции и поглощения пучка | 24 |
| 4.4. Коммутирующие сверхпроводящие шины | 25 |
| 4.5. Системы вывода энергии из основных сверхпроводящих магнитов | 25 |
| 4.6. Производство вакуумного оборудования | 26 |
| 4.7. Электростатические дефлекторы | 26 |
| 4.8. Использование электронного охлаждения в режиме ион-ионных столкновений на LHC | 28 |
| 4.9. Вклад России в LHC и его значимость | 29 |
| 5. Вклад России в создание детекторов на LHC | 29 |
| 5.1. Детектор ATLAS | 30 |
| 5.2. Детектор CMS | 34 |
| 5.3. Детектор ALICE | 38 |
| 5.4. Детектор LHCb | 42 |
| 6. О модернизации LHC | 44 |
| 7. Об участии России в проекте ILC | 45 |
| 8. О молодых | 47 |
| Заключение | 48 |
| Список литературы | 49 |

Козлов Геннадий Алексеевич
Матвеев Виктор Анатольевич
Саврин Виктор Иванович

О ПОЛЬЗЕ УЧАСТИЯ В ПРОГРАММАХ ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ЧАСТИЦ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

2014-49

Редактор *Е. В. Калининкова*
Верстка *И. Г. Андреевой*
Обложка *Ю. Г. Мешенкова*

Подписано в печать 29.09.2014.

Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 4,19. Уч.-изд. л. 4,1. Тираж 135 экз. Заказ 58340
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, 6
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/