

ИЗУЧЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИИ. СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА CMS НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ ЦЕРН

И. А. Голутвин, А. В. Зарубин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Research Of A Matter's Fundamental Properties. Creation Of The Experimental Complex CMS At The Large LHC Collider

I. A. Golutvin, A. V. Zarubin

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

Проект экспериментального комплекса CMS (Компактный мюонный соленоид) — многоцелевого детектора на коллайдере LHC, крупнейшего из когда-либо создаваемых установок, объединяет ученых и инженеров из 37 стран. Важной и неотъемлемой частью этого проекта является сотрудничество CMS России и других стран участниц ОИЯИ (RDMS). Коллаборация RDMS объединяет около 300 ученых и обеспечивает широкомасштабное и долговременное участие физиков из стран-участниц ОИЯИ в крупнейшем научном проекте современности. Важное значение имеет широкое вовлечение промышленности и потенциала отраслевой науки участвующих стран. Ядерная физика, физика частиц или физика высоких энергий — это яркий пример сочетания самых фундаментальных дисциплин о природе материи с новейшими достижениями инженерных наук и технического прогресса. Более того, технический прогресс общества в значительной мере обязан достижениям в этой науке.

The CMS (Compact Muon Solenoid) Project — the multi purpose detector at the LHC collider, one of the biggest experimental installation ever built, joint efforts of scientists and engineers from 37 countries. Important and essential part of this project is the CMS Collaboration of Russia and Dubna Member-States (RDMS CMS). RDMS collaboration joint about 300 scientists and provide large-scale and long-term participation of physicists from JINR member-states in the first-string modern scientific project. Important aspect is wide involvement of national industries and technical potential of branch-wise science of participating countries. Nuclear physics, particle physics or high energy physics is shining example of combination of fundamental knowledge of nature structure and modern achievement in engineering science and technical progress. Even more, the technical progress of society is driven by achievements of particle physics.

ВВЕДЕНИЕ

В течение 15 лет ведущие институты России, Объединенный институт ядерных исследований, ОИЯИ (Дубна) и институты ряда стран-участниц ОИЯИ участвуют в создании многоцелевой экспериментальной установки CMS (Компактный Мюонный Соленоид), предназначенной для выполнения программы научных исследований на крупнейшем в мире ускорительно-накопительном комплексе LHC (Большой адронный коллайдер), сооружение которого завершается в 2007 г. в Европейском Центре ядерных исследований (ЦЕРН), расположенном в Женеве на швейцарско-французской границе.

Проект CMS является одним из грандиозных проектов, который предполагает широкое международное научное сотрудничество для изучения фундаментальных свойств материи. Использование детектора CMS для экспериментов на встречных пучках при сверхвысоких энергиях протонов и ядер на LHC позволит осуществить прорыв в изучении фундаментальных

законов природы, применимых для сверхмалых расстояний, что даст возможность открыть новые горизонты в изучении структуры материи.

Реализация проекта CMS объединяет опыт создания и эксплуатации экспериментальных установок, накопленный во всем мире на протяжении последних десятилетий. Подобно тому, как открытие атомной структуры, волновых свойств материи и квантовой механики в начале XX столетия обеспечило бурное развитие науки и технологии, результаты экспериментов на LHC не только дадут возможность установить фундаментальные законы физики частиц, но также могут привести к открытиям, которые определяют генеральное развитие науки и технологии в XXI веке.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР LHC

Грандиозный проект XXI века — Большой адронный коллайдер LHC, развивающийся по инициативе ла-

уреата нобелевской премии Карло Руббиа, был утвержден Советом ЦЕРН в 1994 году. Запуск коллайдера в Европейской лаборатории ядерных исследований в Женеве планируется в 2007 году. LHC должен ускорить каждый из встречных пучков протонов до энергии 7 ТэВ при светимости $10^{34} \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$ и периоде взаимодействия пучков 25 нс. Наряду с ускорителем проект предполагает создание двух многоцелевых установок ATLAS и CMS и двух специализированных установок, ALICE — для исследования взаимодействий тяжелых ионов и LHC_V — для исследования в области физики В — мезонов.

В эру LHC физика частиц становится действительно интернациональной наукой. Около 20% вклада в создание ускорителя и экспериментальных установок должно быть осуществлено странами не участниками ЦЕРН. Международная кооперация сотен и даже тысяч физиков становится важнейшим условием для создания огромных экспериментальных комплексов и выводит ученых на планетарный масштаб беспрецедентной величины, редко достигаемых в других областях науки. В октябре 1995 года комитет научной политики национальной российской программы по физике частиц и фундаментальной ядерной физике, проходивший в Арзамасе-16, определил участие российских лабораторий в проекте LHC как важнейшее направление национальной программы России. Страны-участницы ОИЯИ участвуют в проекте CMS в рамках Коллаборации CMS России и стран-участниц ОИЯИ (RDMS CMS).

ПРОБЛЕМАТИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ LHC

За последние 40 лет физики достигли глубокого понимания в области элементарных частиц и закономерностей, которым подчиняются материя, энергия, пространство и время. Это понимание сформулировано в так называемой Стандартной Модели — современной концепции строения вещества. Основными составными частями материи в Стандартной модели являются: 6 лептонов (наиболее известный лептон — электрон), 6 кварков, частицы-переносчики взаимодействий (фотоны, Z и W бозоны, глюоны), поле Хиггса, которое дает массу всем частицам. Стандартная модель — замечательная теория, эксперименты полностью подтвердили ее предсказание с изумительной точностью, все предсказанные ей частицы были обнаружены. Существует только одно исключение: еще не найден бозон Хиггса.

Три типа взаимодействий из четырех известных могут быть объединены на единых принципах в Стандартной модели — слабое, электромагнитное и сильное. К сожалению, в этой картине не участвуют хорошо известные гравитационные силы. При увеличении энергии слабые взаимодействия становятся сильнее, а сильные — слабее. Возникает вопрос, не происходит ли с увеличением энергии объединение всех сил в одну. Кварки и лептоны объединены в три набора, названные

поколениями материи. Три поколения выстроены в порядке возрастания масс, входящих в них частиц. Но почему три? Вся видимая материя Вселенной состоит из частиц одного поколения up-кварков, down-кварков и электронов. Спрашивается, зачем нужны остальные два поколения?

В Стандартной модели для каждого типа частиц материи существуют соответствующие частицы антиматерии. «Железное» правило — частицы материи и антиматерии рождаются и уничтожаются вместе в парах. Возникает вопрос: если материя и антиматерия включены в Стандартную модель на равных основаниях, то почему во Вселенной материи намного больше антиматерии? Или почему материя и антиматерия не аннигилировали взаимно на ранних стадиях эволюции Вселенной? Наблюдая структуру нашей Вселенной — галактики, скопления галактик и т. д. в последние годы было сделано удивительное открытие, что только около 5% материи состоит из «обычной» материи, а 95% — это «невидимая» материя и энергия, природа которых неизвестна.

Таким образом, являясь выдающимся событием на долгом пути поиска истины, Стандартная Модель взаимодействий тем не менее бессильна ответить на ключевые вопросы:

- Происхождение массы фундаментальных «кирпичиков» (кварков, лептонов).
- Почему существует три поколения частиц материи.
- Причины доминирования материи над антиматерией и образования наблюдаемой структуры Вселенной.
- Источник «темной» материи во Вселенной.
- Возможность унификации трех сил.
- И сверх всего, что делать с гравитацией?

Поиск ответов на перечисленные выше вопросы и составляет основу научной программы исследований на Большой Адронной Коллайдере.

ДЕТЕКТОР CMS

Международная коллаборация CMS, объединяющая 1877 ученых и инженеров из 163 институтов из 37 стран, создает многоцелевой детектор — Компактный Мюонный Соленоид (CMS) для коллайдера LHC [1] с целью получения ответов на перечисленные выше ключевые вопросы.

Для выполнения физических задач требуется прецизионное измерение характеристик регистрируемых частиц в широкой области энергий с высоким энергетическим и импульсным разрешением. Основой детектора CMS, схема которого приведена на рис. 1, является сверхпроводящий соленоидальный магнит с внутренним диаметром около 6 м и полем 4 Тесла, окруженный железным возвратным ярмом с массой 12000 тонн. Встречные пучки протонов направлены по оси соленоида, а центр соленоида выбран в месте

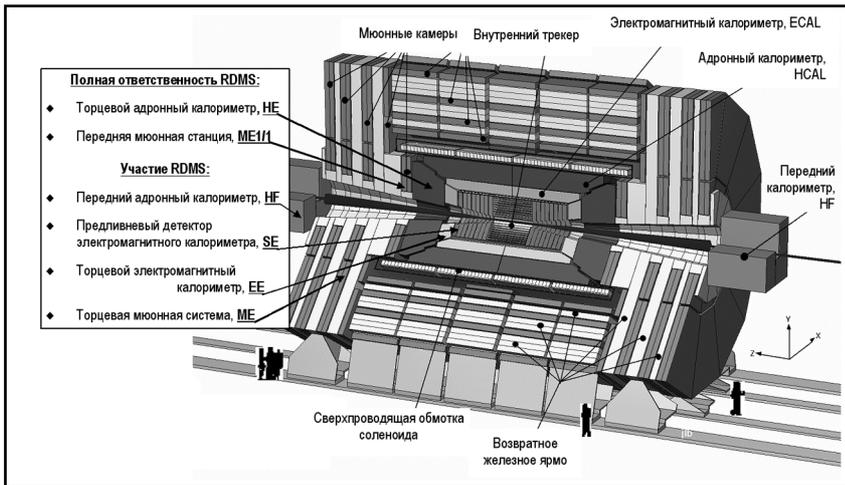


Рис. 1. Общий вид Компактного мюонного соленоида — CMS. Общий вес установки — 14500 тонн, внешний диаметр — 14,60 м, длина — 21,60 м, магнитное поле соленоида — 4 Тесла. В рамке показаны системы, за создание которых Коллаборация CMS России и стран-участниц ОИЯИ несет ответственность.

встречи пучков — точке взаимодействия, локализованной с точностью десятков микрометров. Во внутреннем объеме соленоида располагаются трекер, передняя станция мюонной системы и калориметры. Ядро магнита используется в качестве поглотителя и служит для размещения остальных камер мюонной системы. Такая конфигурация обеспечивает компактность и эффективную идентификацию, регистрацию и измерение параметров практически всех мюонов, образующихся во взаимодействиях. Структурно установку можно разделить на цилиндрические и торцевые модули, включая передние калориметры (HF). Начиная от точки взаимодействия, последовательными слоями, подобно луковице, располагаются: внутренняя трековая система, предливневые детекторы, электромагнитные (ECAL) и адронные (HCAL) калориметры и, наконец, детекторы мюонной системы. Каждый слой предназначен для регистрации определенного сорта вторичных частиц.

В цилиндрической части треки мюоны многократно регистрируются с точностью 200 мкм четырьмя станциями, состоящими из 250 двенадцати-слойных дрейфовых камер, содержащих 192 тысячи каналов регистрации. Торцевые мюонные станции состоят из 540 шести-слойных, двух координатных газовых пропорциональных камер с секционированными катодами и общим числом 310 тысяч каналов регистрации. Эти камеры имеют пространственную точность лучше 150 мкм в каждом слое, временное разрешение около 3 наносекунд и способны избирательно регистрировать мюонные треки в условиях большого фона вторичных частиц. В каждой станции располагаются дополнительные плоскости из 760 резистивных планарных камер с временным разрешением несколько наносекунд, которые совместно с другими мюонными камерами служат для выработки запуска установки при прохождении мюона.

Внутренний трекер служит для регистрации и сшивки всех восстановленных треков адронов, электронов и мюонов и распознавания всех треков с поперечным импульсом свыше 2 ГэВ. Цилиндрические и торцевые плоскости из кремниевых детекторов с мелкоячеистой структурой считывания должны обеспечить разрешение лучше 15 мкм при самой высокой светимости ЛНС. Общая площадь кремниевых детекторов трекера составляет 223 м², число каналов — около 10 миллионов.

Электромагнитный калориметр (ECAL) на основе сцинтиллирующих кристаллов вольфрамата свинца обеспечивает идентификацию и прецизионное измерение энергии отдельных фотонов и электронов. Для этого используется 76 тысяч кристаллов с индивидуальными каналами считывания. Предливневый детектор на основе кремниевых детекторов с полосковой структурой считывания обеспечит разделение фотона и фона от распада нейтрального пиона и измерение направления фотона без ухудшения массового разрешения ди-фотонов. Общая площадь кремниевых детекторов предливневого детектора составляет 18 м², число каналов — около 144 тысяч.

Адронные калориметры (HCAL) вместе с передними калориметрами (HF) идентифицируют и измеряют энергию и направление струй частиц и адронов. Они обеспечивают герметичность измерения потоков энергии для определения недостающей поперечной энергии вплоть до очень малых углов. В структуре цилиндрических и торцевых адронных калориметров (HCAL) в качестве поглотителя используется латунь, прослоенная чувствительными ячейками пластического сцинтиллятора с общим числом 8 тысяч каналов считывания. В структуре передних адронных калориметров (HF) в качестве поглотителя используется железо, прослоенное кварцевыми волокнами с общим числом 2 тысячи каналов считывания.

Для создания этих детекторов использованы самые современные, высокоточные технологии, чтобы удовлетворить требованиям физики на CMS.

КОЛЛАБОРАЦИЯ CMS РОССИИ И СТРАН-УЧАСТНИЦ ОИЯИ

Группы ученых и специалистов из российских институтов и институтов из других стран-участниц ОИЯИ, эффективно организованные, как Коллаборация CMS России и стран-участниц ОИЯИ (RDMS), являются неотъемлемой и важной составной частью коллаборации CMS [2]. Участниками проекта CMS

являются 292 ученых из 21 института из 8 стран. В том числе — 56 ученых из ОИЯИ, 106 — из 7 стран-участниц ОИЯИ и 130 — из 6 российских институтов. Кроме этого группы специалистов из 4 российских отраслевых институтов являются ассоциированными членами проекта CMS.

Концепция коллаборации России и стран участниц ОИЯИ заключается в объединении усилий многих групп из разных институтов и стран, концентрации усилий на нескольких хорошо определенных подсистемах CMS (в частности на торцевой системе детекторов), широкое вовлечение промышленности участвующих стран. Это позволило объединить научные, технические и финансовые вклады и обязательства отдельных институтов в качестве совместного вклада коллаборации в эксперимент, обеспечить заметность и значительность этого вклада в проект, а также принять полную ответственность за разработку и реализацию ряда под-проектов CMS.

Финансирование и вклады российских институтов и ОИЯИ, как международной организации, расположенной на территории Российской Федерации, определены в «Дополнении к Протоколу об участии в проекте Большого Адронного Коллайдера (ЛHC)» и «Меморандуме о взаимопонимании коллаборации по созданию детектора CMS». Для стран участниц ОИЯИ существуют два варианта участия в коллаборации России и стран участниц ОИЯИ: через ОИЯИ, используя долевой вклад страны в бюджет ОИЯИ, или/и вклад непосредственно в проект CMS. Финансовые обязательства и вклады стран зафиксированы в трехсторонних соглашениях между страной, ОИЯИ и ЦЕРН. Например, «Соглашение по координации участия в проекте CMS», подписанное Государственным комитетом по науке и технологии республики Беларусь, ОИЯИ и ЦЕРН определяет финансовую ответственность и вклад республики Беларусь в эксперимент CMS. Другим примером является «Протокол о финансировании проектов по созданию установки CMS», подписанный институтом Ядерных Исследований и Ядерной Энергии Болгарской Академии Наук, Софийским Университетом и ОИЯИ. В этом документе зафиксированы финансовые обязательства и вклад республики Болгария в эксперимент CMS с использованием долевого вклада страны в бюджет ОИЯИ. Аналогичные соглашения подписаны с Арменией, Грузией, Украиной и другими участниками коллаборации России и стран участниц ОИЯИ. Эти обязательства реализуются через контракты, заключаемые ОИЯИ со странами-участницами.

С самого начала заметный вклад групп RDMS в разработку, и развитие детектора был хорошо отражен в структуре руководства коллаборации CMS. В настоящее время это широкое участие привело к назначению специалистов RDMS координаторами подсистем установки, которые представлены в руководстве всей коллаборации и объединяют усилия многих групп из различных институтов, которые концентрируют свои усилия

на разработке, оптимизации, создании и эксплуатации экспериментального комплекса CMS по различным основным направлениям. На рис. 1 приведен общий вид установки CMS с указанием систем и степени участия RDMS в проектах по созданию детекторов.

Именно организация коллаборации RDMS позволила физикам России и стран-участниц ОИЯИ нести полную ответственность в торцевой области детектора CMS, как это было определено в начальном проекте RDMS [2], за торцевые адронные калориметры (HE) и передние мюонные станции (ME1/1). А также, в кооперации с другими институтами CMS, принять участие в под-проектах преддлинных детекторов (SE), торцевых электромагнитных калориметрах (EE), торцевой мюонной системе (ME), передних адронных калориметрах (HF) и комплекса вращающейся передней радиационной защиты (FS). Кроме этого физики RDMS естественно участвуют в развитии физической программы, реконструкции и отборе событий и создании базового математического обеспечения и компьютеринга.

УЧАСТИЕ RDMS В СОЗДАНИИ ДЕТЕКТОРА CMS

Основные усилия RDMS по разработке, оптимизации и созданию установки сконцентрированы на торцевой системе детекторов и, в первую очередь, торцевых адронных калориметрах (HE), передних мюонных станциях (ME1/1), за которые RDMS несет полную ответственность.

Физики RDMS внесли значительный вклад в разработку концепции CMS и детекторных систем. Результаты тестов многочисленных прототипов подтвердили, что характеристики разработанных детекторов удовлетворяют требованиям эксперимента. На основе результатов методических исследований разработаны конструкции HE, ME1/1 и других систем, проведена интеграция торцевых детекторов в единый инженерный комплекс. Успешная защита и утверждение инженерных проектов комиссиями международных экспертов дали зеленый свет для серийного, многолетнего изготовления детекторных систем в национальных центрах с привлечением промышленности. После доставки детекторов и узлов в ЦЕРН, в наземном экспериментальном зале проведен комплексный монтаж детекторов и аппаратуры. В 2006 году осуществлен запуск сектора установки, оборудованного аппаратурой считывания, и магнита. На рис. 2 показан общий вид установки во время подготовки к магнитному тесту. Достигнуто проектное значение магнитного поля 4 Тесла, отработана совместная работа различных детекторных систем и проведен набор данных на космических мюонах. Начато опускание крупных частей установки в подземный экспериментальный зал, расположенный на глубине 90 метров. Запуск ускорителя ЛHC и установки CMS запланирован в сентябре 2007 года.

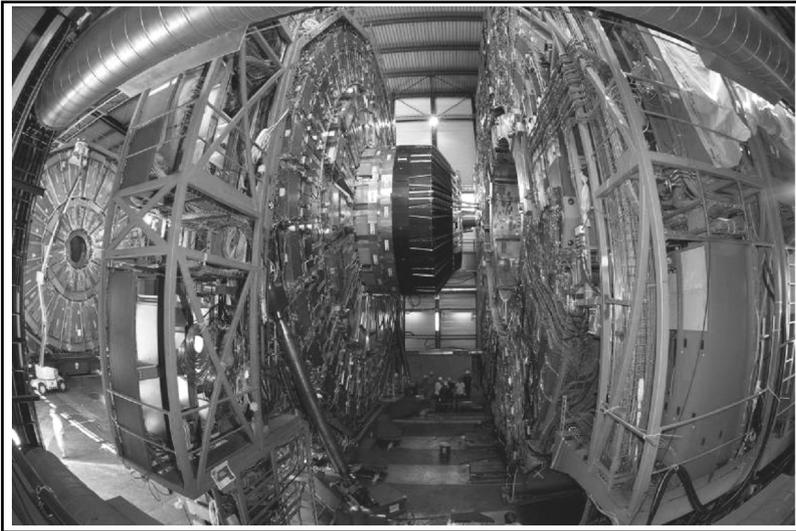


Рис. 2. Торцевая система детекторов (в центре) в наземном экспериментальном зале CMS во время «закрывания» установки — стыковки с цилиндрической системой (справа), при подготовке к магнитному тесту. Август 2006 г., ЦЕРН.

1. Создание адронных калориметров

ОИЯИ совместно с ИФВЭ (Протвино), НИКИ-ЭТ (Москва), НЦ ФЧВЭ (Минск), ХФТИ и институтом Монокристаллов (Харьков) несут полную ответственность за разработку и создание торцевых адронных калориметров (HE). ОИЯИ координирует эту деятельность и отвечает за создание поглотителя калориметра.

Для решения задач как стандартной, так и новой физики, важнейшими характеристиками адронного калориметра являются энергетическое (и пространственное) разрешение струй частиц и энергетическое разрешение невидимой поперечной энергии. Это требует: хорошей герметичности, хорошей поперечной сегментации для разделения двух — струйных событий, приемлемого энергетического разрешения, достаточной глубины поглотителя и, наконец, минимизации мертвых зон для измерения невидимой энергии. Вариант калориметра, основанный на светосборе с помощью спектросмешивающего волокна, встроенного в пластины (тайлы) пластического сцинтиллятора, прослоенные латунным поглотителем удовлетворяет всем этим требованиям [2, 3]. Торцевой калориметр HE перекрывает широкий диапазон передних углов. Поперечная сегментация — проективная и согласована с сегментацией электромагнитного калориметра. HE содержит 18 активных слоев сцинтиллятора и дополнительный слой перед поглотителем для коррекции некомпенсированного EE. Полная толщина калориметра вместе с EE составляет около 10 ядерных длин поглощения.

Внутренняя структура слоя калориметра составляет: латунь -79 мм, алюминий — 2,0 мм, сцинтиллятор — 3,7 мм. Энергетическое разрешение калориметра составляет порядка 10% при энергии 100 ГэВ и улучшается с ростом энергии, пространственное разрешение — около 5 мм при 100 — 300 ГэВ.

Максимальная расчетная доза превышает 10 МРад за 10 лет работы на ускорителе. Исследования показали, что радиационные повреждения приводят к уменьшению световыхода до 50% при такой дозе. Несмотря на это, энергетическое разрешение не ухудшится, если продольное изменение световыхода в пределах сегмента проективной башни не превышает 20%, а световыход от минимально ионизирующей частицы составит не менее 1 фотоэлектрона после облучения. Кроме этого, сцинтилляционные тайлы первых 5 слоев при малых углах изготовлены из радиационно-стойкого сцинтиллятора, разработанного в Харькове. Для мониторинга световыхода предусмотрена калибровка радиоактивным источником и лазером. Экспериментально показано, что световыход для пионов увеличивается до 6% и насыщается в аксиальном магнитном поле.

Работа по созданию торцевых адронных калориметров проведена с широким привлечением промышленности. На рис. 3. приведена схема и география изготовления торцевых адронных калориметров. Разработка интерфейса HE/UE — системы подвески торцевых детекторов SE, EE, HE и ME1/1 с общим весом ~300 тонн на железном диске возвратного ярма, потребовала глубокой инженерной проработки специалистов всех участвующих организаций и согласования с интеграционной группой CMS и службами ЦЕРН. В результате было най-

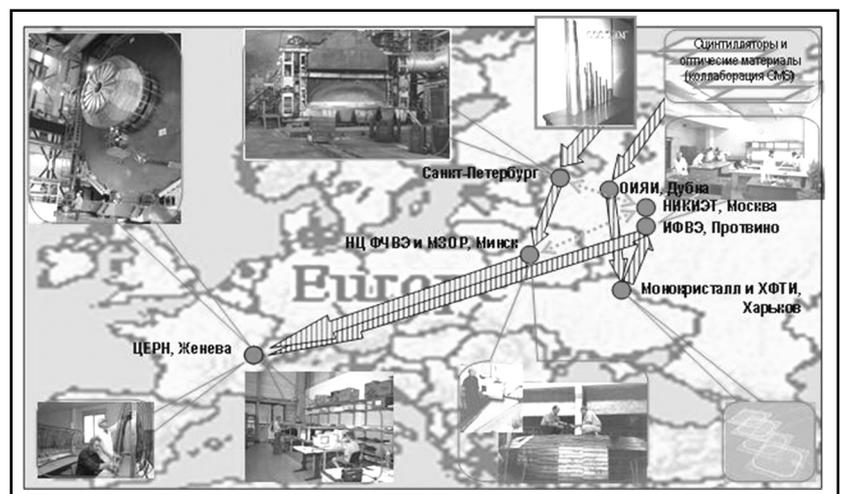


Рис. 3. Организация и география этапов изготовления торцевых адронных калориметров.

дено элегантное решение компенсации больших магнитных сил. Для уменьшения деформаций и напряжений под действием веса и магнитного поля, по предложению НИКИЭТ используется скользящее соединение между задним фланцем HE и опорной трубой, и жесткое соединение по внешнему периметру с помощью рам из материала повышенной прочности.

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 в Беларуси. Организацию поставок, сопровождение изготовления поглотителя и технический контроль качества на всех этапах обеспечивал НИКИЭТ (Москва). Сцинтилляционные тайлы изготовлены в институте Монокристалл (Харьков) из материалов, поставленных коллаборацией. Изготовление, сборка и тестирование оптических элементов (метатайлов) проведены в ИФВЭ (Протвино). Монтаж торцевых калориметров в наземном экспериментальном зале CMS проведен по технологии, разработанной специалистами RDMS.

Совместно с торцевыми, передние адронные калориметры HF — обеспечивают герметичность измерения потока энергии частиц и струй. Физиками ИТЭФ, Москва предложен новый тип радиационно-стойкого калориметра, основанный на регистрации черенковского света в кварцевом волокне, внедренном в стальной поглотитель. Измерения подтвердили, что для кварцевого калориметра характерны узкий поперечный профиль от адронных ливней и очень быстрый и короткий сигнал. Эти особенности калориметра позволят минимизировать фон при максимальной светимости LHC.

Совместно с Российским федеральным ядерным центром Всероссийским НИИ технической физики (Снежинск) разработана оригинальная технология изготовления секторов поглотителя. Проведено моделирование по оптимизации конструкции передних калориметров и согласована конфигурация поглотителя. Разработаны конструкции поглотителей передних калориметров, технология изготовления секторов поглотителя. Все сектора изготовлены и доставлены в ЦЕРН. Пучковые тесты серийных секторов, оборудованных кварцевыми волокнами и системой считывания, показали, что световой выход составляет 0,25 фотоэлектрона на 1 ГэВ и соответствует требованиям CMS. Завершена сборка и оборудование кварцевыми волокнами передних калориметров в ЦЕРН. Оба калориметра размещены в наземном экспериментальном зале CMS.

2. Создание мюонной системы

ОИЯИ и институты Беларуси и Болгарии несут полную ответственность за разработку и создание передних мюонных станций (ME1/1).

Станция ME1/1 играет ключевую роль эксперименте т.к. обеспечивает согласование треков между мю-

онной системой и внутренним трекером. Моделирование показало [3], что она должна иметь существенно лучшее разрешение по сравнению с торцевой мюонной системой — порядка 75 мкм. Кроме этого временное разрешение ME1/1 должно составлять несколько наносекунд для эффективной идентификации момента взаимодействия. Требования уникальных характеристик входят в противоречие с экспериментальными условиями. Станция располагается в магнитном соленоиде перед железным ярмом и поэтому должна работать в сильном аксиальном магнитном поле около 3 Тесла. В зоне станции достигается самый большой фон вторичных частиц до 1 кГц/см². Наконец, существуют жесткие пространственные ограничения на размещении станции. В практике физического эксперимента не существовало аналогов такого детектора.

В 1993 г. для торцевой мюонной системы была предложена методика проволочных газовых камер с катодным считыванием [1], развиваемая в Дубне. Впервые большая катодная камера размером 3×1,5 м была разработана в Дубне в рамках методической программы развития первого совместного ОИЯИ — ЦЕРН эксперимента NA4 в 1979 г. Однако широкое применение методики в то время было ограничено большим количеством каналов прецизионной аналоговой электроники. Прогресс в развитии технологии микросхем в последнее десятилетие открыл реальную возможность использования этой перспективной методики в современном эксперименте. Многослойные катодные камеры обеспечивают прецизионное измерение азимутальной координаты кривизны трека в магнитном поле путем измерения распределения зарядов, наведенных на несколько катодных стрипов; измерение радиальной координаты с точностью до шага группы анодных проволочек; высокое временное разрешение благодаря короткому времени дрейфа и измерению второго сигнала от шести плоскостей.

В результате многолетних методических исследований были изучены эффекты влияния сильного магнитного поля на пространственное разрешение и способы их компенсации. Оптимизировано количество слоев камер для обеспечения высокой эффективности регистрации треков жестких мюонов с учетом их радиационного сопровождения. Совместно с минской группой разработаны специализированные входные анодные и катодные микросхемы, согласованные с параметрами камер и обеспечивающие высокие нагрузочные способности. Результаты исследований серии прототипов показали, что характеристики и нагрузочные способности катодных стриповых камер удовлетворяют требованиям эксперимента CMS. Камеры с электроникой, разработанной RDMS и изготовленной в Минске, могут работать при низком газовом усилении в области $(5-7) \times 10^4$, для исключения эффектов старения, с достаточной трековой эффективностью, пространственным разрешением и временным быстродействием. Ухудшение характеристик камер при ожидаемом уровне фона LHC достаточно мало.

Станция ME1/1 располагается в области системы подвески адронного калориметра, где проходят все кабели и системы обслуживания торцевых детекторов над зоной ME1/1. Для обеспечения доступа к электронике камер ME1/1 система подвески адронного калориметра сконструирована таким образом, чтобы бы все коммуникации предливневого детектора, электромагнитного и адронного калориметров располагались в Z-образных кабельных каналах на элементах системы интерфейса. Компоновка зоны ME1/1 оптимизирована таким образом, чтобы обеспечить достаточное место для триггерных детекторов RPC и обеспечить эффективный защитный экран против фоновых нейтронов. Компоновка электроники была предметом глубокого изучения из-за жестких ограничений на мертвые зоны, связанных с необходимостью обеспечения герметичности всей установки.

Серийное изготовление камер ME1/1 проведено в ОИЯИ на специально оборудованном технологическом участке. В Минске изготовлена анодная электроника. В Болгарии созданы элементы систем высоковольтного и низковольтного питания камер. Все камеры первой мюонной станции доставлены в ЦЕРН, оборудованы электроникой считывания и прошли многократные испытания. Завершен монтаж, настройка и запуск мюонных станций ME1/1 в магнитном поле соленоида CMS.

Группа физиков и инженеров ПИЯФ (Гатчина) в сотрудничестве с американскими институтами принимает участие в создании торцевой мюонной системы. Группа сыграла ведущую роль в разработке и создании прототипов катодных стриповых камер. Исследования эффектов старения камер показали незначительную деградацию характеристик при аккумулированной дозе, соответствующей 40 годам работы в условиях реального эксперимента на ЛНС. Основным вклад ПИЯФ в эксперимент заключается в изготовлении камер ME2,3,4/1 торцевой мюонной системы. При изготовлении камер использовалось базовое технологическое оборудование и материалы, поставленные коллаборацией. Завершены серийная сборка камер, доставка в ЦЕРН и монтаж в составе установки.

3. Участие в создании электромагнитных калориметров

Новый тип электромагнитного калориметра на основе сцинтиллирующих кристаллов вольфрамата свинца, предложенный российскими физиками из ИФВЭ в 1994 году — самый точный прибор для измерения энергий фотонов и электронов. В сотрудничестве с ЦЕРН и научными центрами России и Беларуси, после пяти лет научно-методических исследований по программе тяжелых сцинтиллирующих кристаллов вольфрамата свинца, на Богородицком заводе теххимических изделий разработана уникальная технология изготовления лучших в мире кристаллов с характеристиками, соответствующими спецификации эксперимента, включая радиационную стойкость. Выигран

международный тендер, и в Богородицке размещен заказ на изготовление более 60 тысяч кристаллов. Система для контроля серийных кристаллов разработана учеными RDMS и поставлена в ЦЕРН. Ученые RDMS продолжают исследования по фундаментальным свойствам кристаллов и их применению в других областях.

Для расположения кристаллов в калориметре в ОКБ имени «Мясищева», Жуковский совместно с физиками ИЯИ, Москва разработаны прецизионные тонкостенные многоячеистые механические структуры — альвеолы на основе углеродной волоконной технологии. Завершено серийное производство около 600 таких структур для торцевой части калориметра. Партии альвеол, поставленные в ЦЕРН, продемонстрировали высокое качество, соответствующее требованиям CMS. Для регистрации света, выделяемого в кристаллах в Центральном НИИ «Электрон», Санкт-Петербург совместно с физиками ПИЯФ, Гатчина разработаны фотоприемники — вакуумные фото-триоды для работы в сильном магнитном поле. Выигран международный тендер и на «Электроне» размещены контракты на изготовление 15 тысяч вакуумных фото-триодов. Серийное изготовление вакуумных фото-триодов завершено с высоким качеством и характеристиками, удовлетворяющими требованиям CMS.

4. Участие в создании предливневых детекторов

ОИЯИ и институты Армении и Беларуси участвуют в под-проекте предливневого детектора SE торцевой электромагнитного калориметра. На основе так называемой кремниевой программы, инициированной ОИЯИ более 10 лет тому назад, в сотрудничестве с Дубной и ЦЕРН в Научно-исследовательском институте материаловедения (Зеленоград) разработана передовая в мире технология изготовления радиационно-стойких кремниевых координатных детектор, для предливневого детектора SE. Предливневый детектор располагается непосредственно перед электромагнитным калориметром и служит для разделения гамма кванта от нейтрального пиона и измеряет координату гамма кванта. Конструктивно детектор состоит из двух поглотителей, обеспечивающих 95% вероятность конверсии, и двух сдоев координатных кремниевых детекторов с шириной стрипов 2 мм. Результаты исследований системы детекторов SE+ECAL удовлетворяют требованиям проекта.

Выполнены многочисленные исследования радиационной стойкости полномасштабных детекторов. Результаты показывают стабильное поведение детекторов после нейтронного облучения, соответствующего 10 годам работы в реальных условиях эксперимента. Серийное изготовление около 2 тысяч кремниевых стриповых детекторов завершено в Зеленограде в кооперации с Дубной и ЦЕРН.

5. Участие в создании передней радиационной защиты

Эксперименты на коллайдерах нового поколения будут проводиться в условиях жесткого радиационного

фона. При проектной светимости ЛНС рождается около 10^{11} вторичных частиц в секунду. При этом расчетная радиационная доза детекторов при малых углах превышает десятки МРад за 10 лет работы на ускорителе. Специалистами ИФВЭ (Протвино) и ЦЕРН проведены исследования и моделирование радиационного фона, разработана и оптимизирована радиационная защита различных детекторов. Кроме этого дополнительные потоки частиц приходят в экспериментальный зал из туннеля ускорителя от каскадов, рожденных при потерях частиц гало и взаимодействия пучка с остаточным газом в вакуумной камере. Для подавления этого фона специалистами ИФВЭ (Протвино) и ЦЕРН спроектирован комплекс передней радиационной защиты в области интерфейса пучкового канала и экспериментального зала. В основу концепции, с учетом ограниченности пространства, положена конструкция с трансформируемой формой. Изготовление системы завершено на Савеловском машиностроительном заводе. Обе системы поставлены в ЦЕРН и смонтированы в подземном экспериментальном зале CMS.

6. Вклад в образование и промышленность

Проект CMS потребовал создания беспрецедентно сложного оборудования, основанного на использовании последних достижений высоких технологий в рамках международного сотрудничества. Существенный вклад коллаборации RDMS в проект CMS естественно предусматривал долговременное и широкое вовлечение промышленности стран-участниц ОИЯИ в создание установки. Это обеспечило возможности для международного промышленного сотрудничества и получения заказов.

Участие одаренных и молодых российских ученых и инженеров в этом Проекте позволяет существенно увеличить их навыки и профессиональное мастерство в научных, технических и социальных областях деятельности, таких как электроника, информатика, управление и т.п. Это чрезвычайно важно для осуществления долгосрочных научных проектов. В настоящее время молодые ученые в возрасте 20—30 лет участвуют в деятельности RDMS и демонстрируют способность эффективно работать в условиях большой коллаборации. ЦЕРН также осуществляет финансовую поддержку участия российских студентов в программе летних школ, организуемых в ЦЕРН.

Задача RDMS «Развитие программного обеспечения и моделирование физических процессов применительно к торцевой и передней области детектора CMS» организована с участием молодых физиков. В рамках этой задачи сконцентрированы усилия на физических процессах при малых углах [3], в области основной аппаратурной ответственности RDMS.

УЧАСТИЕ RDMS В РАЗРАБОТКЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ CMS

Как было отмечено ранее, Стандартная Модель фундаментальных взаимодействий прекрасно описыва-

ет большинство экспериментальных данных, полученных на современных ускорителях. Однако существует ряд проблем, открытых в рамках Стандартной Модели, для решения которых, в свое время, были предложены теоретические концепции, имеющие много феноменологических следствий, проявляющих себя именно при энергии Большого адронного коллайдера. Экспериментальный комплекс CMS представляет уникальные возможности как для проверки положений Стандартной Модели в новой области энергий, так и для поиска новой физики за рамками Стандартной Модели. Главная экспериментальная трудность заключается в крайне низкой вероятности появления представляющих интерес событий в присутствии огромного числа фоновых процессов. Были проведены детальные исследования по оптимизации установки и систем сбора данных с учетом тщательного моделирования отклика CMS детектора для того, чтобы все детекторные системы соответствовали определенным требованиям и условиям, необходимым для решения поставленных задач.

Физики RDMS активно участвуют в физической программе CMS практически по всем направлениям исследований во всех подсистемах установки от генерации новых теоретических идей и постановки задач, вплоть до воплощения этих предложений в реальную физическую программу, включающую все этапы подготовки к набору экспериментальной информации, ее обработки и анализа. Часть групп анализа координируется молодыми физиками RDMS. В течение многих лет работает физическая секция RDMS. Задачей которой является концентрация усилий ученых RDMS на нескольких важных направлениях.

В частности, физики RDMS инициировали большой и важный цикл исследований процессов с образованием в конечном состоянии пары мюонов высоких энергий, как одно из приоритетных направлений физической программы CMS. Отправной точкой этих исследований послужили многочисленные предсказания новых явлений и новых частиц в сценариях с большими дополнительными измерениями пространства, в расширенных калибровочных моделях и т. п., которые могут проявлять себя в лептонных и, в частности мюонных модах.

Важную роль в формировании программы исследований играют ежегодные международные конференции RDMS, на которых обсуждаются физические проблемы и в которых активно участвуют многие ученые CMS из ЦЕРН, США и других стран. Конференции RDMS проводились в ЦЕРН (1995—1999 гг.), в Москве (2000—2001 гг.), в Протвино (2002 г.), в Дубне (2003 г.), в Минске, Беларусь (2004 г.), в Санкт-Петербурге (2005 г.) и в Варне, Болгария (2006 г.).

КОМПЬЮТЕРНЫЕ КОММУНИКАЦИИ

Физики коллаборации России и стран — участниц ОИЯИ вносят значительный вклад в создание экс-

Необходимы компьютерные ресурсы к 2007 году

Tier	CPU, kSI2K	Disk, TB	Active tape, TB	Archive tape, TB	Tape I/O, MB/s
Tier-0 (CERN)	3176	309	2246	0	800
Tier-1	2100	1450	1070	0	400
Tier-2	310	190	0	115	100

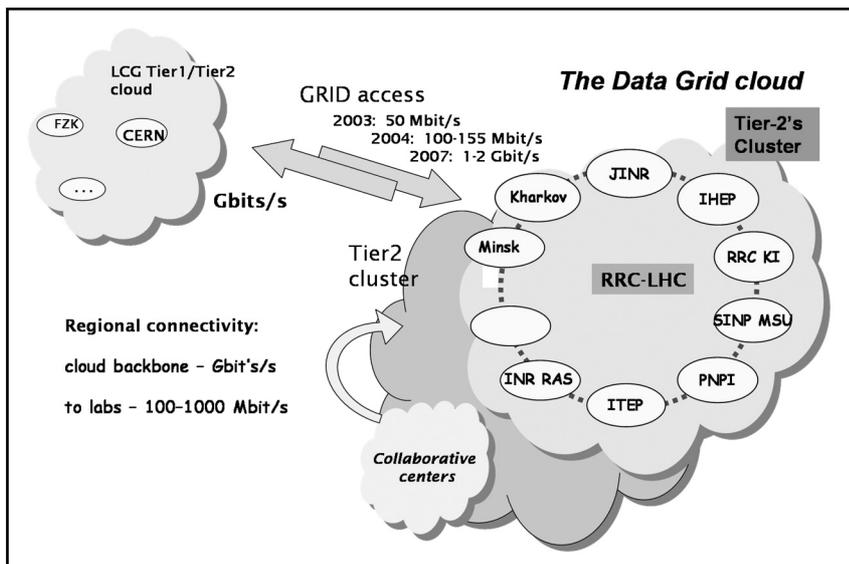


Рис. 4. Концепция организации компьютерных сетей RDMS и их взаимодействия с вышестоящими уровнями.

периментального комплекса и развитие физической программы CMS. Но огромные усилия и значительные достижения коллаборации России и стран — участниц ОИЯИ оправдаются, если будет обеспечено широкое участие физиков из наших стран в обработке и анализе физической информации. Наиболее важным шагом в этом направлении является подготовка адекватных условий для физического анализа. При этом надо ясно представлять географическую децентрализованность научных организаций и их отдаленность от непосредственного места сбора экспериментальной информации (ЦЕРН). Другой особенностью экспериментов на LHC является чрезвычайно большой поток информации, поступающих с электронных каналов детекторных систем. Так полный поток данных от установки CMS превышает 1 Гбит/с, что составляет примерно 1 Петабайт в год. Более того, после различных этапов обработки объем первоначальной информации будет увеличиваться (примерно на 50%), т. к. к «сырым» данным будут добавляться характеристики реконструированных объектов (кластеров, треков, сегментов, а потом и части, струй и т. д.). Поэтому в CMS разрабатывается гибкая модель хранения, обработки и передачи данных, обеспечивающая доступ к информации любого уровня всем пользователям. В основу этой модели положена концепция распределенных вычислительных систем, объединенных в центры (кластеры) различного уровня или яруса (Tier). Эти ярусы различаются как по возложенным на них задачам, так и по компьютерным мощностям (см. таблицу). Эти

уровни не имеют жесткой иерархической структуры, а представляют собой объединение нижестоящих ярусов, которые взаимодействуют друг с другом, с определенным вышестоящим ярусом или даже напрямую с любым другим ярусом.

Институты России и стран-участниц ОИЯИ, каждый из которых представляет собой уровень-2, объединены в некоторый центр (облако) уровней ранга 2, с некоторыми функциями уровня-1 (см. рис. 4).

Естественным условием нормального функционирования такой системы является наличие высокоскоростных компьютерных коммуникаций между уровнями всех рангов. Поэтому ближайшей задачей RDMS является создание быстрых внутренних связей ~1

Гб/с между институтами RDMS и изучение внешних коммуникаций с ЦЕРН.

Кроме развития сетевых коммуникаций и наращивания компьютерных мощностей RDMS активно ведет разработку собственной модели обработки и анализа данных, учитывающей все особенности — от нюансов конкретной физической задачи (количество сигнальных и фоновых событий, необходимости создания специфических алгоритмов обработки и реконструкции и т. д.) до топологии и характеристик уровней-2, входящих в кластер RDMS. Естественно, что эта модель должна быть полностью совместима с моделью CMS, т.е. должна быть построена на тех же операционных системах, оперировать данными тех же типов и использовать одни и те же базы данных для хранения информации.

В этой связи особое место занимает задача настройки и поддержания баз данных, т.к. вся экспериментальная информация LHC будет доступна исключительно через централизованные системы хранения и распределения данных. В настоящее время одной из приоритетных задач RDMS является участие в создании баз данных, применяемых в CMS, оптимизации быстродействия протоколов доступа к ним и их взаимодействия друг с другом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Огромный потенциал фундаментальной национальной науки в сочетании с научно — техническим по-

тенциалом прикладной науки и промышленности, и благодаря большой материальной поддержке Правительств участвующих стран, позволили ученым RDMS занять достойное место в одном из крупнейших проектов XXI века. Успешное выполнение обязательств по созданию установки CMS открывает российским ученым возможность участия в физике на LHC. Это особенно привлекательно для молодых ученых. Много молодых российских ученых уже принимают участие в проекте CMS.

Литература

1. Баян Г. и др. Коллаборация CMS, Технический Проект, CERN/LHCC/94-38, 1994.
 2. Голубин И. А. и др. Проект RDMS CMS коллаборации «Изучение фундаментальных свойств материи в протон — протонных и ядро — ядерных взаимодействиях при высоких энергиях на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН. Создание установки CMS». CMS документ 96-85, 1995.
 3. Труды ежегодного совещания коллаборации RDMS CMS, 11—15 декабря 1995 г., ЦЕРН, стр. 1—200, CMS Document 1996-075.
Труды 2 ежегодного совещания коллаборации RDMS CMS, 16-17 декабря 1996 г., ЦЕРН, стр. 1—499, CMS Document 1996-213.
Труды 3 ежегодного совещания коллаборации RDMS CMS, 16-17 декабря 1997 г., ЦЕРН, стр. 1—430, CMS Document 1997-168.
Труды 4 ежегодного совещания коллаборации RDMS CMS, 15-16 декабря 1999 г., ЦЕРН, стр. 1—144, CMS Document 1999-113.
Труды 5 ежегодного совещания коллаборации RDMS CMS, Физическая программа на установке CMS, 22—24 ноября 2000 г., ИТЭФ, Москва, стр. 1—627, CMS Document 2000-058.
- Труды 6 ежегодного совещания коллаборации RDMS CMS, Физическая программа на установке CMS, 19—21 декабря 2001 г., МГУ, Москва, стр. 1—568, CMS Document 2001-047.
- Труды 7 ежегодного совещания коллаборации RDMS CMS, Физическая программа на установке CMS, 13—15 ноября 2002 г., ИФВЭ, Протвино, стр. 1—600, CMS Document 2002-027.
- Труды 8 ежегодной конференции коллаборации RDMS CMS, 3—7 декабря 2003 г., ОИЯИ, Дубна, том 1—2, CMS Document 2003-018.
- Труды 9 ежегодной конференции коллаборации RDMS CMS, Физическая программа на установке CMS, 28 ноября — 2 декабря 2004 г., НЦ ФЧВЭ, Минск, Беларусь, CMS Document 2004-015.
- Труды 10 ежегодной конференции коллаборации RDMS CMS, 9—16 сентября 2005 г., Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия, CMS Document 2005-013.
- Труды 11 ежегодной конференции коллаборации RDMS CMS, 12—16 сентября 2006 г., Варна, Болгария, CMS Document RDMS-06.