



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Петербургский Институт Ядерной Физики им. Б.П. Константинова

# ШИЯФ

---

Участие в подготовке и проведении  
экспериментов на LHC

ГАТЧИНА 2009

## Предисловие

Научное сотрудничество ПИЯФ с ЦЕРН началось в 60-е годы с подписания первого договора о сотрудничестве. В то время ПИЯФ был филиалом Ленинградского физико-технического института. Затем, в 1976-1980 гг., последовало два успешных эксперимента (WA9 и NA8) по дифракционному рассеянию протонов с энергией до 400 ГэВ на пучках ускорителя SPS. В основу этих работ был положен новый экспериментальный метод, разработанный в ПИЯФ – детектор протонов отдачи ИКАР. Позднее ПИЯФ участвовал в эксперименте L3 на электрон-позитронном коллайдере LEP. В тесном сотрудничестве развивались также проекты ISOLDE в ЦЕРН и ИРИС в ПИЯФ, посвященные получению и исследованию ядер, удаленных от полосы ядерной стабильности.

Последние 10 лет одним из важнейших направлений научной деятельности ПИЯФ была подготовка экспериментов на LHC (эксперименты CMS, ATLAS, LHCb и ALICE). ПИЯФ участвовал на всех стадиях подготовки этих экспериментов, начиная с концептуальной проработки проектов создаваемых коллайдерных детекторов. Затем, на стадии реализации этих проектов, ПИЯФ взял на себя беспрецедентные для института обязательства по участию в разработке и изготовлении важнейших подсистем коллайдерных детекторов:

концевая мюонная система (система EMU) в CMS,  
центральный трекер – детектор переходного излучения (система TRT) в ATLAS,  
мюонная система в LHCb,  
мюонная система в ALICE.

Для изготовления экспериментального оборудования для этих систем в ПИЯФ были организованы несколько специализированных участков, оснащенных специально разработанным для этих целей технологическим оборудованием. На этих участках более 100 специалистов ПИЯФ напряженно трудились в течение более семи лет. Были созданы также различные испытательные стенды для контроля за всеми производственными процессами и для тестирования изготовленного оборудования.

Производство в ПИЯФ экспериментального оборудования для экспериментов на LHC было успешно завершено в 2006 году. Все оборудование было доставлено в ЦЕРН, где оно прошло повторные испытания. Эти испытания подтвердили высокое качество изготовленного в ПИЯФ оборудования. Следующим этапом был монтаж и запуск коллайдерных детекторов. В этих работах специалисты ПИЯФ приняли самое активное участие.

Еще одним важным направлением работ, связанным с будущим развитием LHC, является исследование возможности применения недавно открытого коллаборацией ПИЯФ – ИТЭФ – ОИЯИ нового физического явления (объемное отражение протонов высокой энергии в изогнутых кристаллах) для коллимации протонных пучков ускорителя LHC. Это может решить одну из сложных задач проекта LHC – устранение гало пучка, делая тем самым возможным достижение высоких светимостей, запланированных на LHC. Изучение этих возможностей проводится в ЦЕРН в рамках проекта КРИСТАЛЛ (эксперимент UA9), в котором группа ПИЯФ играет важную роль.

Большой вклад, внесенный ПИЯФ в создание коллайдерных детекторов на LHC, открывает возможность полноправного участия физиков ПИЯФ в анализе будущих экспериментальных данных. С этой целью в ПИЯФ создан специальный вычислительный комплекс, включенный в международную систему GRID, и образованы физические группы, ориентированные на анализ данных, получаемых в экспериментах на LHC.

Представленные далее сообщения более детально рассказывают об участии ПИЯФ в подготовке экспериментов на LHC.

А.А. Воробьев  
Член-корреспондент РАН  
Директор Отделения физики высоких энергий  
Петербургского института ядерной физики РАН

## Эксперименты на большом адронном коллайдере ЛНС – новая эра в физике высоких энергий

Результатом выдающихся открытий в экспериментальной и теоретической физике элементарных частиц стала формулировка Стандартной Модели, которая обеспечивает теперь самосогласованную картину мира элементарных частиц и описывает с поразительной точностью практически все имеющиеся экспериментальные факты. Эти достижения были тесно связаны с прогрессом в создании ускорителей частиц высоких энергий. В частности, важный вклад в развитие и становление Стандартной Модели был сделан недавними экспериментами на  $e^+e^-$ -коллайдере LEP (90 ГэВ + 90 ГэВ) в ЦЕРН и на  $p\bar{p}$ -коллайдере Тэватрон (1 ТэВ + 1 ТэВ) в Лаборатории им. Энрико Ферми (США). Отметим, что ПИЯФ принимал активное участие в эксперименте L3 на ускорительном комплексе LEP и в настоящее время он участвует в эксперименте D0 на Тэватроне.

Однако в Стандартной Модели одно важное звено еще отсутствует, а именно: введенная этой Моделью спонтанно нарушенная  $SU(2) \times SU(1)$  калибровочная симметрия с необходимостью требует существования скалярного поля Хиггса. Обнаружение предсказанного теорией Хиггс-бозона является в настоящее время одной из важнейших задач в физике высоких энергий. Современные анализы в рамках Стандартной Модели всех доступных данных по электро-слабому взаимодействию в комбинации с измеренной массой  $t$ -кварка предсказывают массу Хиггс-бозона в диапазоне от 100 до 500 ГэВ при наиболее вероятном значении около 130 ГэВ. Продолжающиеся эксперименты D0 и CDF на Тэватроне, при условии увеличения светимости до  $5 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , имеют некоторые шансы открыть Хиггс-бозон. Более экстенсивный поиск (изучение) Хиггс-бозона будет одной из главных целей Большого Адронного Коллайдера (ЛНС) в ЦЕРН. Энергия сталкивающихся протонных пучков будет составлять 7 ТэВ + 7 ТэВ, а светимость достигнет значения  $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . С такими параметрами ЛНС будет обладать высоким потенциалом для обнаружения Хиггс-бозона во всем предсказанном диапазоне его массы.

Среди ученых широко распространено мнение, что Стандартная Модель не есть еще полностью завершенная теория и «новая физика» должна появиться при энергиях масштаба нескольких ТэВ. Возможное «расширение» Стандартной Модели – это Суперсимметрия, которая позволяет объединить три типа калибровочных взаимодействий в пределе очень высоких энергий. Для всех наблюдаемых в настоящее время частиц Суперпартнеры ожидаются в области масс порядка  $\sim 1$  ТэВ. На ЛНС поиск Суперпартнеров может быть выполнен во всей теоретически ожидаемой области масс.

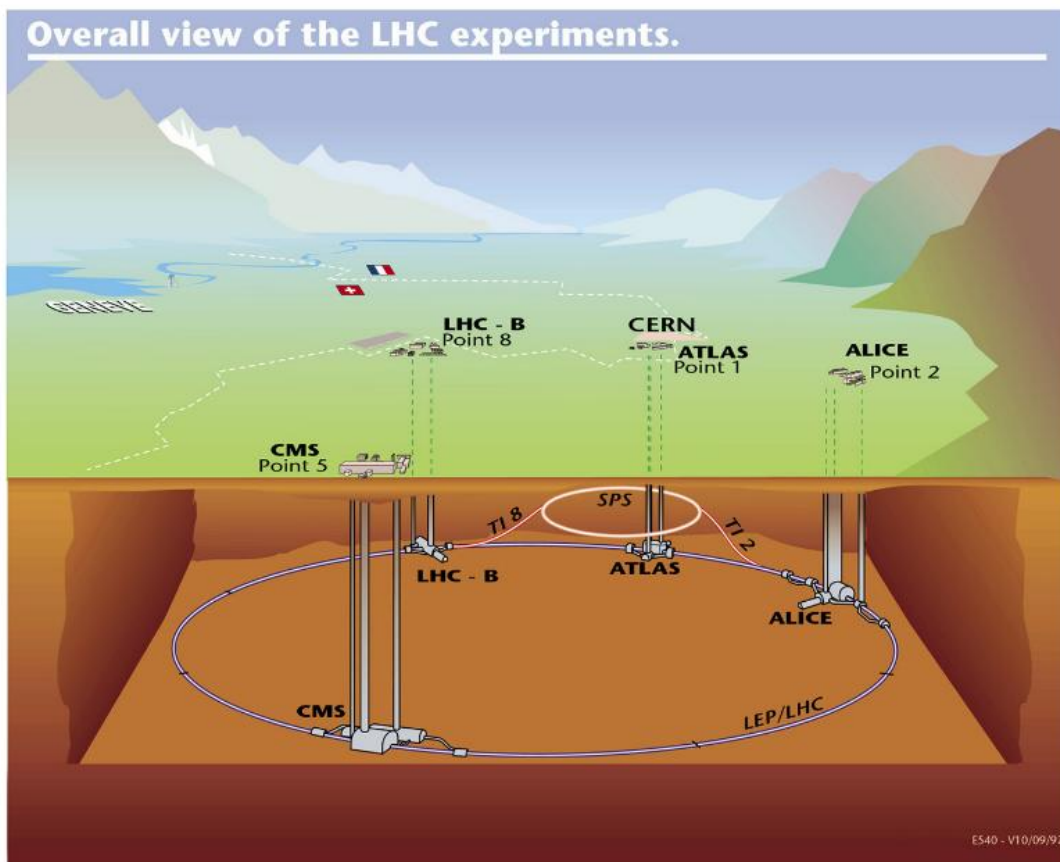
Другие области исследований, охватываемые коллайдером ЛНС, в которых может проявиться «новая физика», включают в себя: поиск новых тяжелых калибровочных бозонов ( $Z'$ , ...), сложное строение лептонов и кварков, многомерность пространства и т.п. ЛНС предлагает также богатые возможности расширить изучение «классических» областей знаний, таких как физика  $t$ -кварков, глюонная плотность при очень низких значениях параметра  $x$ , дифракционные процессы, поведение полных сечений при очень высоких энергиях.

Изучение нарушения  $CP$ -инвариантности в распадах  $B$ -мезонов является также одной из приоритетных задач исследований на ЛНС. Сталкивающиеся на ЛНС пучки протонов являются не имеющим себе равных по интенсивности источником  $B_d$ - и  $B_s$ -мезонов, а также  $B$ -барионов. Это позволит изучать нарушение  $CP$ -инвариантности во многих каналах распадов, представляя тем самым строгий тест Стандартной Модели. Кроме того, изучение редких  $B$ -распадов предлагает путь для поиска «новой физики» за пределами Стандартной Модели.

В дополнение к функционированию в качестве протон-протонного коллайдера, ЛНС будет использован для изучения столкновений тяжелых ядер при с.ц.м. энергии 5,5 ТэВ/нуклон. Плотность энергии столкновений будет значительно выше предсказываемого порога образования кварк-глюонной плазмы. Поиск этого нового состояния материи будет также фигурировать среди важных физических задач, решаемых на ЛНС.

ЛНС сконструирован в существующем тоннеле длиной 27 км (бывший тоннель ускорителя LEP). Четыре детектора (CMS, ATLAS, LHCb, ALICE) располагаются в четырех точках пересечения протонных пучков – см. рисунок внизу. Детекторы спроектированы так, чтобы использовать полностью потенциал ЛНС для реализации новых физических открытий. Детекторы ATLAS и CMS имеют генеральной целью поиск Хиггс-бозонов и «новой физики» с использованием сталкивающихся пучков протонов при максимально достижимой светимости. Детектор LHCb специализирован на изучении *B*-физики с акцентом на детальную идентификацию регистрируемых частиц. Детектор ALICE спроектирован для исследования столкновений тяжелых ядер с целью обнаружения и изучения кварк-глюонной плазмы. Эти эксперименты будут играть ведущую роль в мировой программе фундаментальных исследований в течение ближайших десятилетий, и они могут иметь решающее влияние на развитие физики будущего.

Начиная с 1997 года, ПИЯФ участвует в проектировании и создании детекторов ATLAS, CMS, LHCb и ALICE. Огромное количество экспериментального оборудования, которое должно было быть произведено в ПИЯФ для проектов ЛНС, потребовало организации на площадке ПИЯФ нескольких производственных участков с уникальным технологическим оборудованием и испытательными стендами. Работа выполнялась в тесной кооперации с зарубежными группами, поставлявшими в ПИЯФ большую часть материалов, необходимых для производства. Более ста специалистов ПИЯФ были вовлечены в эту колоссальную работу, продолжавшуюся около 10 лет. Финальная стадия этой работы была успешно завершена к концу 2006 года. Строго в соответствии с производственным графиком, все оборудование было изготовлено, испытано и поставлено в ЦЕРН для монтажа в экспериментальных установках. Все коллаборации подчеркивали высокое качество оборудования, произведенного в ПИЯФ. К середине 2008 года монтаж и ввод в действие всех детекторов были закончены, и была начата подготовка к набору экспериментальных данных.



## Эксперимент CMS

А.А. Воробьев, Н.Ф. Бондарь, С.А. Вавилов, Г.Н. Величко, С.С. Волков, Ан.А. Воробьев, В.Л. Головцов, А.Г. Голяш, Ю.И. Гусев, А.С. Денисов, Г.Ф. Жмакин, Ю.М. Иванов, В.С. Козлов, В.И. Лазарев, В.Д. Лебедев, П.М. Левченко, Г.В. Макаренков, Е.М. Оришин, А.А. Петрунин, Д.М. Селиверстов, **В.А. Скнар**, В.В. Сулимов, В.И.Тараканов, **И.И. Ткач**, Л.Н. Уваров, А.И. Щетковский, Л.А. Щипунов В.И. Яцура

### 1. Введение

Детектор CMS (Compact Muon Solenoid) является универсальным детектором общего назначения для изучения физики протон - протонных столкновений при энергии в системе центра масс 14 ТэВ и полной светимости LHC до  $L = 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Основными целями эксперимента CMS являются физика топ-кварка, поиск Хиггс-бозона, а также поиск «новой физики» за пределами Стандартной Модели (суперсимметричные частицы, новые тяжелые калибровочные бозоны, дополнительные измерения пространства *etc*). Проект детектора CMS подчеркивает важность прецизионных измерений импульсов мюонов, электронов и фотонов для получения высокого разрешения по массам, необходимого для открытия новых частиц. Рис. 1 показывает общий вид детектора CMS. Основные элементы этого детектора:

- Сверхпроводящий соленоид (Superconducting Coil).
- Железное ярмо магнита (Return Yoke).
- Внутренний трекер (Inner Tracker).
- Кристаллический электромагнитный калориметр (Crystal ECAL).
- Адронный калориметр (HCAL).
- Мюонная система (Muon Chambers).
- Передний калориметр (Very Forward Calorimeter).

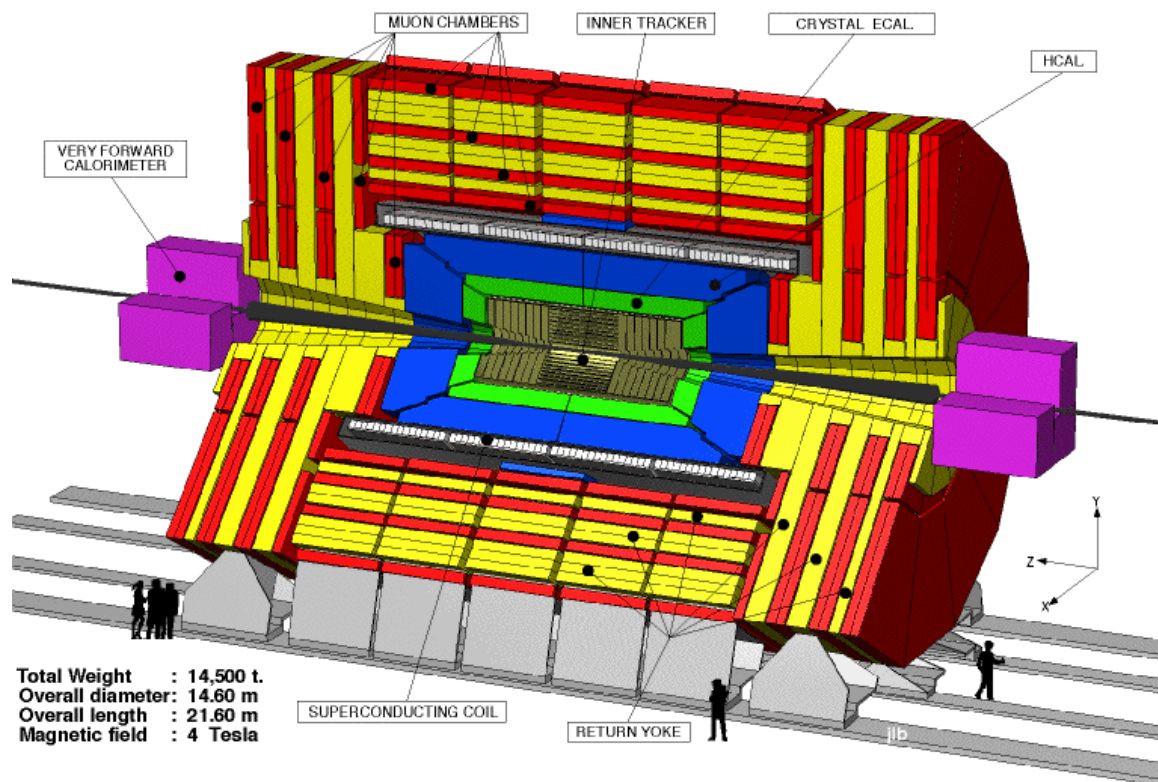


Рис. 1. Общий вид детектора CMS.

## 2. Мюонная Система детектора CMS

Мюонная Система имеет три основные функции: идентификация мюонов, измерение импульса мюонов и мюонный триггер с хорошо определенным  $p_t$  с порогом от нескольких ГэВ/с до 100 ГэВ/с в интервале быстрот до  $\eta = 2,1$ . Разрешение по импульсу  $\delta p_t/p_t$  в автономной моде составляет приблизительно 10% при  $p_t = 10$  ГэВ/с и около 30% при  $p_t = 1$  ТэВ/с. Полное разрешение по импульсу с использованием Внутреннего Трекера составляет приблизительно 1,5% при  $p_t = 10$  ГэВ/с и около 15 % при  $p_t = 1$  ТэВ/с. Мюонная Система встроена в ярмо магнита и состоит из Центральной и Торцевых частей.

Главная ответственность ПИЯФ в проекте CMS – участие в проектировании, изготовлении и обеспечении функционирования Торцевой части Мюонной Системы. Эта работа выполняется с 1994 года в тесном сотрудничестве с группами из Национальной Ускорительной Лаборатории им. Энрико Ферми (FNAL), из университета Флориды и из некоторых других американских университетов.

Фактически разработка мюонных систем для коллайдерных детекторов началась в ПИЯФ еще в 1991 года, когда в США было начато строительство протон-антипротонного Сверхпроводящего Супер-коллайдера (SSC) на энергию 20 ТэВ + 20 ТэВ. В то время ПИЯФ вместе с Брукхэвенской Национальной Лабораторией (BNL) предложили мюонную систему для детектора GEM, который был одним из двух детекторов для SSC. Эта система была основана на применении проволочных катодных стриповых камер (CSC). Во время подготовки этого проекта были созданы и протестированы несколько опытных образцов CSC. Кроме того, были исследованы различные газовые смеси, и одна из них ( $Ar/CO_2/CF_4$ ) была рекомендована для использования. Было продемонстрировано, что такая система может обеспечить пространственное и временное разрешение, достаточное для организации автономного мюонного триггера. В начале 1993 года этот проект был рассмотрен сотрудничеством GEM наряду с двумя другими конкурирующими проектами. В результате, проект, основанный на разработках ПИЯФ и BNL CSC, был принят для всей мюонной системы GEM. К сожалению, строительство SSC было остановлено Конгрессом США в октябре 1993 года. После этого решения несколько американских групп организовали новую коллаборацию, которая предложила в феврале 1994 года построить Торцевую часть Мюонной системы для детектора CMS, подобную разработанной для детектора GEM. ПИЯФ стал членом этой коллаборации.

Мюонная Торцевая система CMS (EMU) состоит из двух симметричных частей (передняя и задняя). Каждая из этих частей содержит четыре Мюонных станции (ME1-ME4). Мюонные станции состоят из мюонных камер, помещенных между железными дисками ярма магнита. Каждый из этих дисков имеет 14 м в диаметре. Станция ME1 имеет три кольца мюонных камер (ME1/1, ME1/2, ME1/3). Станции ME2 и ME3 состоят из двух колец камер (ME2,3/1 и ME2,3/2). Станция ME4 имеет только одно кольцо камер (ME4/1), поскольку изготовление кольца ME4/2 было отложено из-за финансовых ограничений. Полная площадь, покрываемая мюонными камерами, составляет приблизительно 1000 м<sup>2</sup>.

Мюонные камеры [1-4] – это специально разработанные CSC с шестью детектирующими слоями трапецеидальной формы, как показано на рис. 2.

### Conceptual design of a CMS EMU CSC

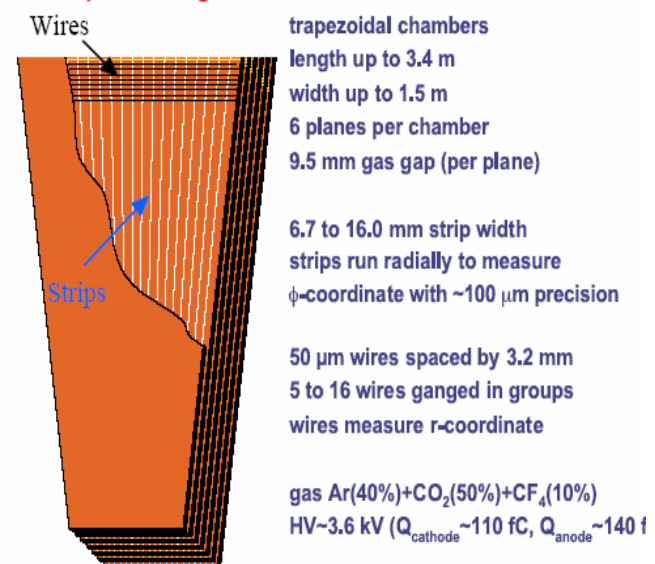


Рис. 2. Эскиз и некоторые параметры CSC.

Катодные панели сделаны из сотовых структур с приклеенными с обеих сторон пластиковыми пластинами (материал FR4), покрытыми медью с наружной стороны. Катодная плоскость разделена на радиально расходящиеся стрипы трапецеидальной формы, которые обеспечивают измерение  $\varphi$ -координаты мюонных треков с точностью до  $\sim 100$  мкм. Анодные проволоки натянуты в перпендикулярном к стрипам направлении и для последующего считывания объединены в группы от 5 до 16 проволок. Они обеспечивают измерение радиальной координаты мюонных треков с точностью несколько сантиметров. Всего система EMU включает 540 мюонных камер, которые содержат около 2,5 миллионов проволок, сгруппированных в 210 816 анодных каналов. Кроме того, имеется 273 024 катодных каналов.

### 3. Изготовление мюонных камер EMU в ПИЯФ

Проектирование мюонных камер и разработка технологии производства камер были выполнены с активным участием ПИЯФ. Изготовление и тестирование камер были распределены между несколькими группами. ПИЯФ был ответственен за изготовление и тесты всех мюонных камер для зон ME2/1, ME3/1 и ME4/1. Всего 120 мюонных камер (40 камер каждого типа) должны были быть сделаны в ПИЯФ. Каждая камера содержит шесть чувствительных слоев. Поэтому фактически нужно было изготовить 720 однослойных камер с полной площадью более  $1400 \text{ м}^2$  и с общим количеством анодных проволок около полумиллиона.

Чтобы выполнить эту задачу, в ПИЯФ было подготовлено специальное производство («фабрика» мюонных камер). Это производство заняло площадь приблизительно  $500 \text{ м}^2$ , включая несколько чистых комнат. Оно было оснащено специальным оборудованием, созданным совместно специалистами ПИЯФ и US CMS. В частности, это оборудование включало машину для намотки анодных проволок, устройство для измерения натяжения и шага проволок, специальные столы для склеивания анодных и катодных баров с панелями, сборочные столы, установку с ионизированным газом (азотом) для очистки анодных проволок, стенд для испытаний камер на герметичность, испытательный стенд с источником  $\gamma$ -излучения, стенд для испытаний камер с использованием космических мюонов и некоторые другие устройства. Это оборудование позволило организовать сборку камер в хорошо контролируемых условиях с необходимой скоростью производства: одна шестислойная камера в неделю. Разработанная технология изготовления камер была одобрена сотрудничеством EMU в июне 2001 года после заключения специальной комиссии по определению готовности производства.

Массовое производство мюонных камер в ПИЯФ было начато в октябре 2001 года. Коллаборация US\_CMS поставляла готовые части мюонных камер (катодные панели, анодные и катодные бары и др.) и большинство материалов, необходимых для сборки камер. Металлические конструкции камер были произведены в ПИЯФ. Процедура сборки контролировалась на каждом этапе: плоскостность катодных панелей, высота газовых промежутков, натяжение проволок, шаг намотки проволок, утечка газа. Собранные камеры проверялись под высоким напряжением с одновременным измерением тока утечки. Требовалось, чтобы величина тока утечки не превышала  $100 \text{ нА}$  в каждой плоскости при номинальном высоком напряжении  $HV = 3,6 \text{ кВ}$ . В случае проблем камеры могли быть демонтированы для дополнительной очистки. Однородность газового усиления контролировалась измерением тока, вызванного коллимированным  $\gamma$ -источником,двигающимся над поверхностью камеры (рис. 3). Максимальные отклонения величины газового усиления от среднего не должны были превышать  $\pm 50\%$ . Все детали процедуры сборки для каждой камеры вместе с результатами контрольных измерений были собраны в специальных папках (рис. 4). Кроме того, эта информация была помещена в специальную базу данных, доступную для сотрудничества EMU через Интернет. Электроника устанавливалась на камерах (рис. 5) только после того, как они прошли все тесты. После этого камеры проверялись на стенде космических лучей (рис. 6).



Рис. 3. Мюонная камера на стенде  $\mu$ -излучения.



Рис. 4. Мюонная камера, готовая к установке электроники.



Рис. 5. Установка электроники на камере.



Рис. 6. Завершающие испытания мюонных камер на стенде космических лучей.

Электроника на камере включает анодные и катодные FE модули, а также логические модули ALCT и CLCT, которые позволяют он-лайн реконструкцию треков, используя сигналы с шести слоев камеры. Программа завершающего испытания включала 36 различных тестов с импульсным генератором и с космическими мюонами. Рис. 7 показывает один из треков космических мюонов, зарегистрированных мюонной камерой. Измеренные амплитуды сигналов в катодных стрипах всех шести слоев показаны красными столбцами, синие столбцы представляют логические сигналы в анодных каналах. После испытаний на стенде космического излучения, камеры были поставлены на месячную тренировку при номинальном высоком напряжении.

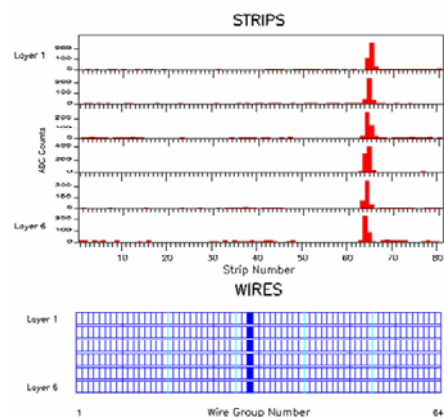


Рис. 7. Трек космического мюона, прошедшего через камеру.



Затем камеры были подготовлены для транспортировки в CERN (рис. 8–9). К концу 2006 года все 120 мюонных камер, изготовленные в ПИЯФ, были благополучно доставлены в CERN.



Рис. 8. Команда ПИЯФ на фоне последних мюонных камер, готовых к транспортировке в ЦЕРН.



Рис. 9. Грузовик с двадцатью мюонными камерами, подготовленными к перевозке в ЦЕРН.

#### 4. Тестирование мюонных камер EMU в CERN и их установка в детекторе CMS



Рис. 10. Высокопоставленные посетители у EMU стенда. Генеральный директор CERN Р. Аймар, министр науки и образования Российской Федерации А. Фурсенко и другие.

Было продемонстрировано, что работа камер не ухудшается вплоть до интегрированной радиационной дозы, соответствующей приблизительно 30 годам работы системы EMU.

На рис. 10 показан рабочий момент посещения EMU стенда высокопоставленными гостями.

Сборка детектора CMS была выполнена в две стадии. Во-первых, все подсистемы были монтированы в зале на поверхности. Рис. 11 показывает, как одна из мюонных камер поднимается специальной системой для установки на железном диске ярма магнита. Можно видеть также камеры, уже установленные на диске. Вся инфраструктура и электроника устанавливались в то же самое время. Это позволило выполнять некоторые тесты системы EMU уже в этой фазе установки. В частности, важные тесты были выполнены в 2006 году с космическими лучами, используя часть собранной системы EMU, включающей мюонные камеры во всех мюонных станциях. Во второй фазе сборки детектора CMS отдельные части были поочередно опущены вниз в подземный зал для заключительной сборки. Рис. 12 демонстрирует процесс спуска одного из железных дисков с

мюонными камерами и всей связанной инфраструктурой. Заметим, что вес диска превышает 1000 тонн. Группа ПИЯФ принимала активное участие в монтаже и испытаниях системы EMU. Эти работы были закончены в начале 2008 года.



Рис. 11. Установка мюонной камеры на железный диск ярма магнита.



Рис. 12. Спуск в подземный зал одного из железных дисков ярма магнита с мюонными камерами.

## 5. Многоканальный источник высокого напряжения для системы EMU

Система EMU состоит из 468 шестислойных мюонных камер. Кроме того, линия высокого напряжения (HV) в каждом слое разделена на несколько секций ( 5 секций в камерах ME2,3/2 и 3 секции во всех других камерах). Таким образом, имеется более чем 9000 секций с независимыми линиями HV. Это существенно увеличивает устойчивость системы, так как в случае проблем в одной из секций только данная секция будет выключена, что не сможет заметно ухудшить работу всей системы EMU.

Такой проект потребовал разработки специальной многоканальной системы высокого напряжения, которая могла бы удовлетворить требования эксперимента CMS. Эта проблема была решена совместными усилиями специалистов ПИЯФ и университета Флориды (UF). Блок-схема разработанной системы высокого напряжения для одного из квадрантов системы EMU представлена на рис. 13. Стенд для тестов системы высокого напряжения EMU в ПИЯФ показан на рис. 14.

Высокое напряжение от первичного источника распределено примерно по 2400 линиям HV с независимым регулированием напряжения в каждой линии. Кроме того, ток в каждой линии находится под контролем с возможностью, в случае необходимости, выключить любую линию плавлением предохранителя. Распределение HV сделано в две стадии. Во-первых, девять главных модулей (Master boards) распределяют HV по 72 линиям с регулированием напряжения от 0 до 4 кВ. Эти линии идут по кабелям ~100 метров длиной к 72 удаленным распределительным модулям (Distribution boards). Каждый такой модуль имеет 30 или 36 выходов, идущих непосредственно к мюонным камерам. Модуль с 30 выходами соединен с одной большой камерой ME2,3/2, модуль с 36 выходами соединен с двумя меньшими камерами. Удаленные распределительные модули могут регулировать напряжение в каждом выходном канале на 1 кВ вниз от  $HV_{max}$ . Максимальный ток в каждом канале системы HV составляет 100 мкА.

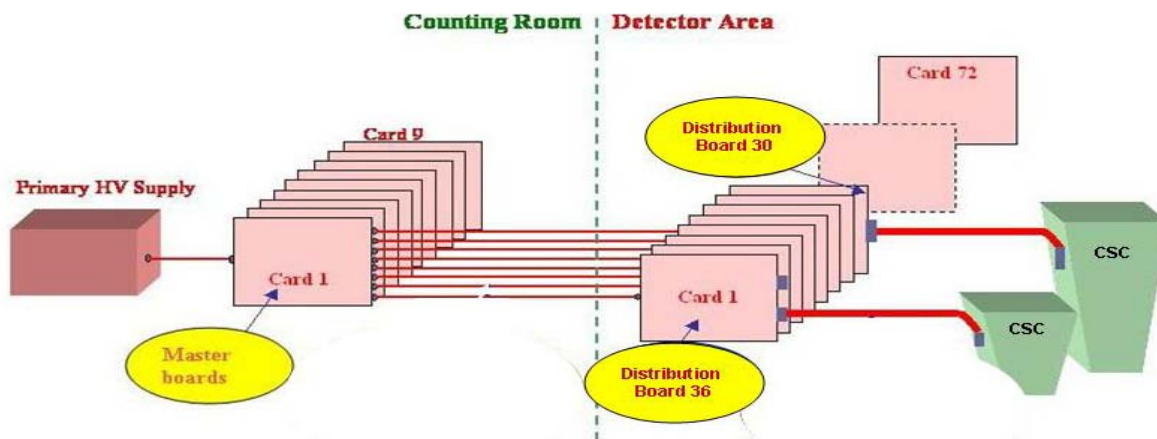


Рис. 13. Блок-схема квадранта EMU системы HV.

Система HV управляется компьютерами с помощью управляющих карт (не показано на рис. 13). Каждая управляющая карта контролирует до 16 распределительных или главных модулей. Важное требование – радиационная устойчивость удаленных распределительных модулей, поскольку они размещены близко к мюонным камерам. Тесты разработанных модулей с гамма- и нейтронной радиацией показали, что они могут работать без проблем в ожидаемой радиационной окружающей среде. Производство системы HV было выполнено сотрудничеством ПИЯФ-UF. К середине 2006 года все модули для системы HV с 9000 каналами (плюс запасные модули для 2500 каналов) были произведены, проверены и доставлены в ЦЕРН.



Рис. 14. Тесты системы высокого напряжения EMU в ПИЯФ.

## 6. Процессор нахождения треков в мюонной системе EMU

Процессор нахождения треков (Track Finding Processor – TFP) является основным элементом триггерной системы EMU [56]. Цель TFP состоит в том, чтобы связать сегменты трека от отдельных мюонных станций в полный трек, измерить поперечный импульс мюона по изгибу трека в магнитном поле и сообщить о числе и качестве отобранных треков глобальному триггеру 1-го уровня. TFP был разработан инженерами ПИЯФ в сотрудничестве с университетом Флориды. Он был осуществлен в виде 12 процессоров, работающих параллельно. Каждый из них должен идентифицировать до трех лучших мюонных треков в соответствующих  $60^\circ$  азимутальных секторах. Блок-схема TFP показана на рис. 15, демонстрация работы процессора TFP представлена на рис. 16.

Проект TFP основан на самых современных программируемых логических интегральных схемах (Field Programmable Gate Array - FPGA), каждая из которых содержит более миллиона логических элементов.

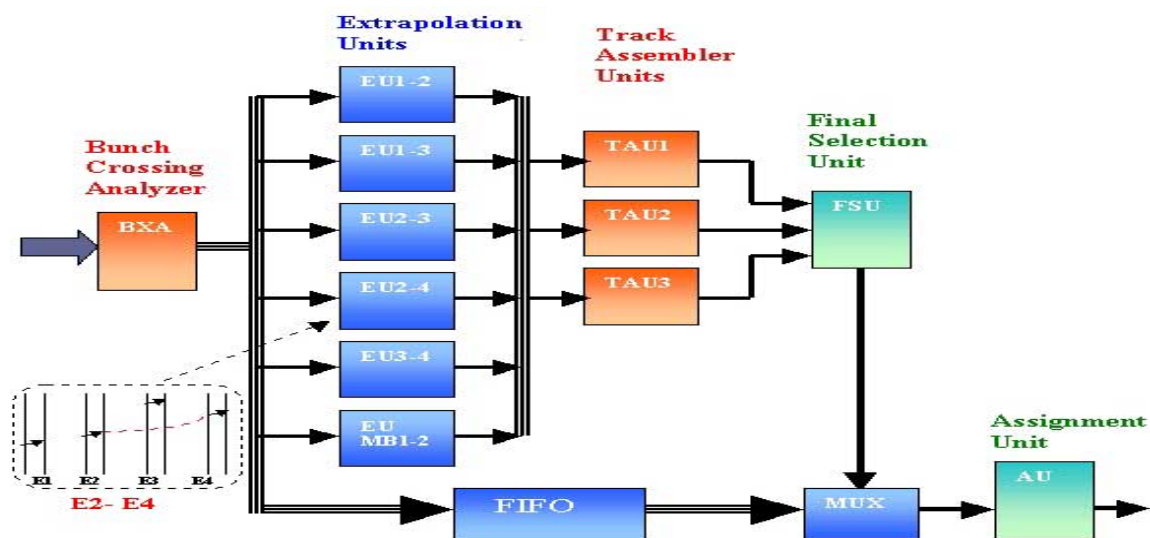


Рис. 15. Блок-схема процессора TFP.

Первый опытный образец TFP был изготовлен в 2000 году и был успешно протестирован в 2000-2001 гг. Он был весьма большой системой, содержащей сорок восемь 9U модулей VME. Время принятия решения этим TFP составляло 375 нс. Опыт, полученный при тестировании этого опытного образца, а также появление на рынке более мощных FPGA, позволили спроектировать новый TFP. Суммарный объем этого TFP был уменьшен в 4 раза (двенадцать 9U модулей VME), а продолжительность обработки была сокращена до 175 нс. TFP был изготовлен американской промышленностью. Тестирование и ввод в действие этой системы были выполнены инженерами ПИЯФ в сотрудничестве со специалистами университета г. Флорида (США). Комбинированные тесты триггерной системы EMU, выполненные на протонном пучке (2004 год) и с космическими лучами (2006 год), подтвердили хорошие параметры процессора.



Рис. 16. Демонстрация работы процессора TFP.

## 7. Анодная придетекторная электроника

Инженеры ПИЯФ в сотрудничестве с университетом Карнеги-Меллон спроектировали анодную придетекторную электронику для мюонных камер EMU [7]. С этой целью были разработаны два модуля интегральных схем. Один из них (СМР16 – показан на рис. 17) включает дискриминатор-усилитель с 16 каналами. Другой модуль (DEL16) обеспечивает программируемую линию задержки для каждого канала, которая позволяет выравнивать время появления сигналов с шагом задержки 2 нс. На основе СМР16 был разработан анодный FE модуль с 16 каналами (AD16). Разработанный модуль проходил через различные тесты на надежность и радиацию. Изготовление СМР16 и DEL16, а также модуля AD16 было выполнено американской промышленностью. Тесты произведенных интегральных схем (22 000) и модулей (12 000) были выполнены специалистами ПИЯФ. К концу 2002 года все модули были проверены и доставлены в ЦЕРН.

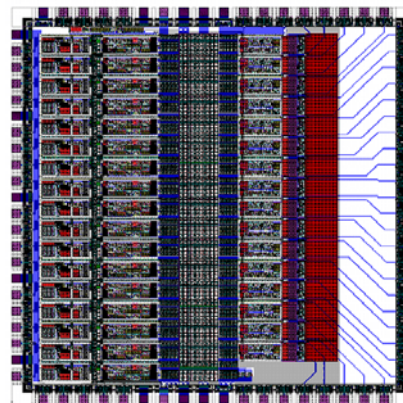


Рис. 17. Интегральная схема СМР16 (16-канальный усилитель-дискриминатор).

## 8. Выстройка мюонных камер в EMU системе

468 мюонных камер EMU закреплены на дисках магнита, занимая площадь 1000 м<sup>2</sup>. Их геометрическое положение в абсолютной системе координат CMS должно быть известно с точностью 100 микрон в азимутальной плоскости и с миллиметровой точностью в Z-направлении. Эта задача становится еще более сложной из-за существенной деформации железных дисков в магнитном поле. Поэтому необходим постоянный контроль за положением мюонных камер. Для этих целей была разработана сложная система, включающая несколько сотен позиционно-чувствительных детекторов, освещаемых лазерными лучами. Эта работа была выполнена инженерами университета Висконсин с активным участием специалистов ПИЯФ [8]. Глобальные тесты этой системы выстройки были выполнены в 2006–2007 гг. Эти тесты показали весьма удовлетворительные результаты.

## 9. Фотодетекторы для Торцевого Электромагнитного Калориметра CMS

Электромагнитный Калориметр (ECAL) CMS состоит из кристаллов вольфрамата свинца (PbWO<sub>4</sub>). Эти кристаллы дают превосходное разрешение по энергии благодаря высокой плотности (8,28 г/см<sup>3</sup>), небольшому радиусу Мольера (2,0 см) и короткой радиационной длине (0,89 см). Кроме того, они обеспечивают весьма быстрый (~10 нс) выходной сигнал, и могут работать в окружающей среде с высокой радиацией. ECAL состоит из Центральной части ( $|\eta| < 1,48$ ) и двух Торцевых частей ( $1,48 < |\eta| < 3,0$ ) с 61200 и 21528 кристаллами, соответственно. Суммарный объем кристаллов составляет 8,14 м<sup>3</sup> (67,4 тонн) в Центральной части и 3,04 м<sup>3</sup> (25,2 тонн) в Торцевых частях.

Свет от кристаллов должен регистрироваться устойчивыми к радиации фотодетекторами, особенно в Торцевых частях, где радиационный уровень намного выше, чем в Центральной части. После обширных исследований предпочтение было отдано кремниевым лавинным фотодетекторам (APD) в Центральной части и к более устойчивым к радиации вакуумным фототриодам (Vacuum Phototriode – VPT) в Торцевых частях. ПИЯФ в сотрудничестве с Научно-исследовательским институтом «Электрон» (НИИЭ, Санкт-Петербург) выполнил исследования различных видов VPT, произведенных в НИИЭ [9–10]. Эти исследования завершились изготовлением VPT (FEU-188), который мог удовлетворить требования эксперимента CMS. Данный VPT имеет плоскую геометрию с фотокатодом (25,5 мм в диаметре), сеткой и твердыми диодами. VPT обеспечивает необходимое усиление в 10–12 раз, и (что является самым важным) это усиление не уменьшается в присутствии магнитного поля до  $B = 4$  Тл. Еще одно преимущество разработанного VPT – низкая чувствительность к изменениям напряжения на аноде.

Вначале в НИИЭ были сделаны 500 образцов VPT. Гамма-радиационные тесты этих VPT показали, что усиление уменьшается только на  $\sim 7\%$  после радиационной дозы 20 кГр (доза, ожидаемая в течение 10 лет работы LHC). Кроме того, VPT были проверены с реальным прототипом ECAL, показав очень хорошие результаты. Основываясь на этих результатах, сотрудничество CMS решило оборудовать Торцевые части ECAL фотодетекторами FEU-188 и подписало контракт с НИИЭ



на производство 16000 VPT. Производство VPT было закончено в середине 2006 года, и они были доставлены в ЦЕРН. Новые тесты показали высокое качество изготовленных VPT. В результате, сотрудничество CMS приняло решение наградить НИИ «Электрон» специальной Золотой медалью CMS-2007 "За выдающийся вклад промышленности в создание детектора CMS".

**Рис. 18.** Вручение золотой медали CMS-2007 Научно-исследовательскому институту «Электрон» "За выдающийся вклад промышленности в создание детектора CMS".

## Литература

1. D. Acosta, ..., N. Bondar, O. Kiselev, O. Prokofiev, V. Razmyslovich, V. Sedov, S. Sobolev, V. Soulimov, N. Terentiev, A. Vorobyov *et al.*, "Large CMS cathode strip chambers: Design and performance". Nucl. Instr. Meth. A **453**, 182 (2000).
2. D. Acosta, ..., N. Bondar, G. Gavrilov, Yu. Ivanov, P. Levchenko, O. Prokofiev, V. Razmyslovich, L. Shchipunov, V. Sedov, I. Smirnov, S. Sobolev, V. Soulimov, V. Suvorov, N. Terentiev, S. Vavilov, A. Vorobyov *et al.*, "Design features and test results of the CMS endcap muon chambers". Nucl. Instr. Meth. A **494**, 504 (2002).
3. O. Prokofiev, N. Bondar, Yu. Ivanov, G. Gavrilov, A. Krivshich, E. Kuznetsova, P. Levchenko, V. Razmyslovich, L. Shchipunov, I. Smirnov, V. Suvorov, N. Terentiev, S. Vavilov, A. Vorobyov *et al.*, "Aging tests of full scale CMS muon cathode strip chambers". Nucl. Instr. Meth. A **515**, 226 (2003).
4. D.V. Balin and G.N. Velichko, "Performance simulation of the cathode strip chambers for CMS endcap muon system". CERN-CMS-NOTE-2005-014, April 2005, 30p.
5. D. Acosta, ..., A. Atamanchuk, V. Golovtsov, V. Sedov, B. Razmyslovich *et al.*, "Development and test of a prototype regional track-finder for the Level-1 trigger of the cathode strip chamber muon system of CMS". Nucl. Instr. Meth. A **496**, 64 (2003).
6. D. Acosta, ..., V. Golovtsov, M. Kan, L. Uvarov *et al.*, "A 3-D track-finding processor for the CMS level-1 muon trigger". In *Proceedings of the Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics CHEP2003* (La Jolla, USA, 24–28 March 2003), p. THHT002, arXiv: physics/0306117
7. T. Ferguson, N. Bondar, A. Golyash, V. Sedov, N. Terentiev and I. Vorobiev, "Anode front-end electronics for the cathode strip chambers of the CMS Endcap Muon detector", Nucl. Instr. Meth. A **539**, 386 (2005).
8. M. Hohlmann, ..., O. Prokofiev, V. Sknar *et al.*, "Design and performance of the alignment system for the CMS muon endcaps", in *Proceedings of the Nuclear Medical Imaging Conference* (San Diego, USA, 29 October – 4 November 2006), p. 489.
9. Yu. Blinnikov, Yu. Gusev, F. Moroz, D. Seliverstov *et al.*, "Radiation hardness, excess noise factor and short-term gain instability of vacuum phototriodes for the operation in pseudorapidity range  $1.5 < \eta < 3.0$  at CMS ECAL". Nucl. Instr. Meth. A **504**, 228 (2003).
10. Yu.I. Gusev, A.I. Kovalev, L.A. Levchenko, F.V. Moroz, D.M. Seliverstov, V.Yu. Trautman, D.O. Yakorev *et al.*, "Super radiation hard vacuum phototriodes for the CMS endcap ECAL". Nucl. Instr. Meth. A **535**, 511 (2004).

## Эксперимент ATLAS

О.Л. Федин, Е.Г. Данилевич, А.Ю. Залите, С.Н. Коваленко, Л.Г. Кудин, В.П. Малеев,  
А.В. Надточий, С.К. Патричев, Ю.Ф. Рябов, Е.В. Седых, Д.М. Селиверстов,  
Э.М. Спириденков, А.Е. Христачев, В.А. Щегельский

### 1. Введение

Основной вклад ПИЯФ в эксперимент ATLAS [1] состоял в разработке и создании детектора переходного излучения Transition Radiation Tracker (TRT), который является частью внутреннего детектора (Inner Detector). Помимо TRT (рис. 1), внутренний детектор состоит из пиксельного вершинного детектора (Pixel Detector) и полупроводникового стрипового детектора SCT (Semi-Conductor Tracker).

Детектор TRT спроектирован для работы в соленоидальном магнитном поле напряженностью 2 Тл при проектной светимости коллайдера LHC (Large Hadron Collider). TRT будет обеспечивать измерение координат треков, используя данные с индивидуальных дрейфовых трубок (straw), и идентификацию электронов, основанную на регистрации фотонов переходного излучения, которые рождаются в пленках радиатора, расположенных между слоями трубок, при прохождении через них заряженных частиц. Геометрия детектора TRT позволяет регистрировать заряженные частицы с поперечным импульсом  $p_t > 0,5$  ГэВ/с и с параметром псевдобыстроты  $|\eta| < 2,1$ . TRT вносит важный вклад в точность измерения импульсов частиц внутренним детектором,

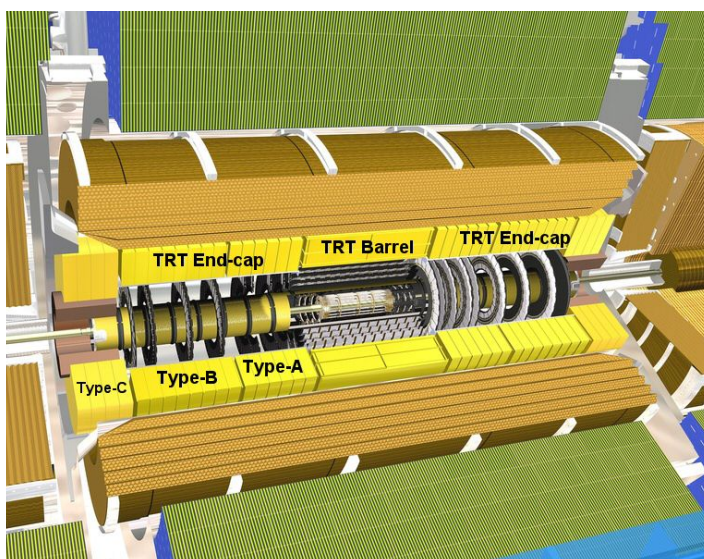


Рис. 1. Детектор переходного излучения TRT в эксперименте ATLAS.

обеспечивая прецизионные измерения координат трека в плоскости  $R-\phi$ . Точность измерения координаты трека одной дрейфовой трубкой должна быть не хуже 180 мкм. Детектор TRT, совместно с жидкоаргоновым электромагнитным калориметром, будет использоваться для идентификации электронов. Идентификация электронов на LHC является гораздо более сложной задачей, чем на существующих адронных коллайдерах, т.к. фон от КХД струй на LHC больше в сотни раз. Поэтому использование переходного излучения для выделения чистого сигнала от инклюзивных электронов с поперечными импульсами  $p_t$  в диапазоне от 20 до 40 ГэВ/с дает дополнительные возможности для подавления фона. Использование переходного излучения также важно при регистрации процессов распада частиц в электрон-позитронные пары для подавления огромного комбинаторного фона от заряженных адронов, а также для идентификации низкоэнергетических электронов в адронных струях от  $b$  кварков.

### 2. Конструкция и основные свойства дрейфовых трубок

Рабочие условия в эксперименте ATLAS [2] накладывают строгие требования на выбор материалов, конструкции, активной газовой смеси и рабочей точки дрейфовых трубок, чтобы гарантировать безопасную и эффективную работу в жестких радиационных условиях. Достаточно большой диаметр дрейфовой трубки способен обеспечить высокую эффективность регистрации

заряженных частиц, но не позволяет собрать все электроны за короткое время между пересечениями пучков 25 нс. Диаметр трубки 4 мм был выбран исходя из оптимизации следующих параметров: скорости отклика, числа ионизационных кластеров, механической и операционной стабильности. Дрейфовые трубки изготавливались из 35 мкм многослойной пленки, произведенной на основе 25 мкм каптоновой пленки. С одной стороны пленки для обеспечения электрической проводимости нанесен алюминиевый слой толщиной 0,2 мкм. Для защиты алюминиевого слоя от повреждения при электрических разрядах на него нанесен графито-полиамидный слой толщиной 5-6 мкм, содержащий примерно 55% углерода. С обратной стороны пленка покрыта 4-5 мкм термосварочным полиуретановым слоем. Трубка изготавливается путем намотки двух пленок шириной 10 мм на металлический стержень при температуре  $\sim 260^{\circ}\text{C}$ . Каптоновая пленка сама по себе обладает плохими механическими свойствами, поэтому дрейфовые трубки, изготовленные из такой пленки, подвержены деформациям из-за изменений температуры и влажности. Для улучшения механических свойств трубок, они армируются четырьмя углеволоконными нитями, которые приклеиваются к наружным стенкам трубки под углом  $90^{\circ}$  по отношению друг к другу при помощи специальной машины Straw Reinforcement Machine (SRM), разработанной в CERN. SRM - полуавтоматическое устройство, в котором углеволоконные нити проходят через последовательность роликов, смачиваются эпоксидной смолой и приклеиваются с равномерным натяжением на поверхность дрейфовых трубок. Для армирования дрейфовых трубок в ПИЯФ был организован специализированный участок (рис. 2), на котором было произведено армирование  $\sim 110000$  дрейфовых трубок длиной 1650 мм. Контроль качества произведенных трубок включал проверку расслаивания армирующих нитей из углеволокна и измерения геометрии трубок (кривизна, внутренний и внешний диаметры, отсутствие локальных деформаций или дефектов). При производстве  $\sim 6000$  трубок в месяц выход дрейфовых трубок требуемого качества составил 98%.

В качестве анодной проволоки дрейфовой трубки была выбрана позолоченная проволока из вольфрама диаметром 30 мкм. Для повышения эффективности регистрации фотонов переходного излучения в дрейфовой трубке используется газовая смесь на основе ксенона ( $70\% \text{Xe} + 27\% \text{CO}_2 + 3\% \text{O}_2$ ). Доля ксенона 70% выбрана с целью обеспечить высокую эффективность регистрации фотонов переходного излучения. Добавка к рабочей смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  обеспечивает стабильность работы трубки и минимизирует время сбора электронов. Детектор TRT будет работать при напряжении 1530 В, которое отвечает для выбранной смеси коэффициенту газового усиления  $2,5 \times 10^4$  [3]. Выделение энергии в дрейфовой трубке складывается из ионизационных потерь заряженных частиц (в среднем  $\sim 2$  кэВ) и поглощенной энергии фотонов переходного излучения ( $>5$  кэВ).

При проектной светимости LHC частота срабатывания трубок (загрузка) составляет около 12 МГц [4]. Кроме ионизирующих частиц вклад в загрузку вносят также медленные нейтроны и



Рис. 2. Участок для армирования дрейфовых трубок (Straw Reinforcement Machine).



низкоэнергетические фотоны. Тепловыделение детектора TRT прямо пропорционально нагрузке и будет составлять около 10–20 мВт на трубку при проектной светимости LHC. Температурный градиент вдоль каждой трубки не должен превышать 10°C для того, чтобы сохранить стабильность работы детектора и однородность коэффициента газового усиления. Для охлаждения детектора применяется продувка газом CO<sub>2</sub> вдоль трубок, что также позволит удалять ксенон, который может попадать во внешний объем детектора в случае нарушения герметичности трубок и приводить к ухудшению эффективности регистрации фотонов переходного излучения из-за поглощения их вне рабочего объема детектора.

### 3. Подготовка дрейфовых трубок

Перед использованием трубок для сборки модулей детектора TRT, они проходили через несколько подготовительных этапов. Армированная трубка имеет длину 1650 мм. На первом этапе трубка разрезается на 4 или 3 коротких трубки (4 длиной ~400 мм для модулей детектора TRT типа А и В, или 3 длиной ~500 мм для модулей детектора TRT типа С). Предварительная нарезка трубок по длине не требовала высокой точности и служила только для удобства дальнейшей работы. Нарезанные трубки проходили через проверку проводимости внутренней поверхности трубки, т.к. от этого зависит распределение высокого напряжения и распространение сигнала вдоль трубки. После этого на один из концов трубки накладывалась токопроводящая паста для обеспечения проводимости между внутренней и внешней поверхностями. Затем, к трубке приклеивались наконечники (end-plugs), служащие для подачи газа в трубку, фиксации анодной проволоки и фиксации трубки в модуле детектора. На последнем этапе наконечник, расположенный на внешнем радиусе модуля детектора TRT, обрезается по длине так, чтобы полная длина трубки с наконечниками с точностью ~100 мкм соответствовала номинальной.

Полностью подготовленные трубки проходили через несколько ступеней контроля качества. Сначала все трубки проверялись на герметичность под избыточным давлением 1 атм. Если давление в дрейфовой трубке падает более чем на 0,1 мбар/бар за минуту, трубка отбраковывалась. После этого трубки проверялись на прямолинейность и, одновременно с этим, измерялась их длина с высокой точностью (~10 мкм). Трубки с кривизной (сагиттой) менее 200 мкм и длиной, отличающейся от номинальной не более чем на 100 мкм, использовались для сборки модулей детектора TRT. На последнем этапе производился визуальный контроль дрейфовых трубок с целью поиска различных дефектов.

Технология подготовки дрейфовых трубок потребовала создания уникальных установок, которые были спроектированы и произведены совместно ПИЯФ и CERN. В ПИЯФ был организован специализированный участок для подготовки трубок (рис. 3), на котором было изготовлено и проверено более 170 000 трубок для модулей детектора TRT типов А и В и более 47 000 трубок для модулей типа С. При производительности 320 трубок в день выход составил 96%.

### 4. Конструкция торцевой части детектора TRT

Конструкция детектора TRT [5] отвечает общим требованиям, предъявляемым к любому трекеру для коллайдерного эксперимента, таким как жесткость и стабильность конструкции, минимальное



Рис. 3. Участок по подготовке дрейфовых трубок для сборки модулей детектора TRT в ПИЯФ.

количество вещества в детекторе. Детектор TRT состоит из центральной части (barrel) и двух торцевых частей (end-cap). Полная длина детектора 6,8 м, диаметр около 2 м.

Каждая торцевая часть TRT состоит из двух наборов одинаковых независимых модулей типа А и типа В. Каждый модуль содержит 8 слоев радиально ориентированных дрейфовых трубок.

Двенадцать 8-слойных модулей типа А расположены между  $827 < Z < 1715$  мм с каждой стороны от точки взаимодействия пучков. Каждый модуль состоит из 6144 трубок, расположенных в 8 последовательных слоях, разделенных расстоянием 8 мм вдоль оси Z. Каждый слой содержит 768 трубок в азимутальной плоскости. Свободное пространство между последовательными слоями трубок, равное 4 мм, заполнено полипропиленовыми пленками радиатора толщиной 15 мкм. Расстояние между трубками в азимутальной плоскости варьируется от 5,2 мм на внутреннем радиусе 640 мм до 8,4 мм на внешнем радиусе 1010 мм. Модули типа А собирались в ПИЯФ.

Восемь 8-слойных модулей типа В с каждой стороны расположены между  $1719 < Z < 2725$  мм. Модули типа В идентичны модулям типа А, за исключением увеличенного до 15 мм расстояния между последовательными слоями трубок. Это свободное пространство также заполнено пленками радиатора. Количество пленок примерно в два раза больше по сравнению с модулями типа А. Модули типа В собирались в ОИЯИ в Дубне.

Таким образом, торцевая часть детектора TRT содержит всего 245760 трубок. В среднем трек от заряженной частицы будет пересекать от 32 до 45 трубок в зависимости от  $\eta$ .

## 5. Конструкция и сборка модулей детектора TRT

Основным сборочным элементом детектора TRT является 8-слойный модуль, который собирался из двух 4-слойных модулей.

Дрейфовые трубки вставлялись и клеивались (рис. 4) без каких-либо механических усилий в прецизионно просверленные отверстия во внутреннем и внешнем углепластиковых кольцах, которые служили поддерживающей структурой для трубок. Трубки, будучи армированы углеволоконными нитями, сами по себе являются частью механической структуры модуля. Прямолинейность трубок должна быть лучше 300 мкм, т.к. стабильность работы трубки сильно зависит от смещения анодной проволоки от оси трубки. Поэтому каждая трубка подвергается визуальному контролю на прямолинейность после установки и после клеивания. В случае необходимости, искривленные трубки заменялись. Собранный механический модуль (углепластиковые кольца с трубками) проходила через процедуру испытания на герметичность.

Для подачи высокого напряжения на катоды трубок и считывания сигналов с анодной проволоки применялись гибкие печатные платы (Wheel Electronic Board – WEB). Гибкая печатная плата содержит два гибких слоя с разводкой на полиамидной пленке. Каждый такой слой содержит отверстия с металлизированными лепестками. Первый гибкий слой используется для обеспечения надежного высоковольтного соединения с катодом трубки. Специальные непроводящие заглушки вставляются через лепестки в дрейфовые трубки. Металлизированные лепестки раздвигаются заглушкой, создавая контакт с внутренней поверхностью трубки. Сигнальные соединения осуществляются таким же образом – с использованием второго гибкого слоя печатной платы и специально разработанных



Рис. 4. Сборка модулей детектора TRT в ПИЯФ. Установка и клеивка трубок в поддерживающие углепластиковые кольца.

позолоченных медных втулок, которые вставляются через лепестки гибкой печатной платы во втором слое. Эти втулки используются для фиксации анодной нити на внешнем радиусе трубки (рис. 5). Другой тип медных втулок, покрытых изоляцией с внешней стороны, используется для фиксации нити на внутреннем радиусе трубки. Печатные платы WEB предназначены для передачи сигналов на платы электроники посредством трех разъемов, каждый из которых соответствует 32 каналам.



**Рис. 5.** Сборка модулей детектора TRT в ПИЯФ. 4-слойный модуль подготовлен к натяжению нитей

Третье углепластиковое кольцо на внешнем радиусе приклеивается к жесткой части плат WEB. На противоположную сторону поддерживающих колец, соединенных с платами, приклеиваются стеклотекстолитовые пластины, обеспечивая создание прочной механической структуры. Такая структура служит в качестве газового объема для 4-слойного модуля на внешнем радиусе. Газовый объем на внутреннем радиусе создается из формованных каптоновых структур, которые приклеиваются к внутреннему кольцу. Газовая смесь подается в модуль через внешний газовый объем одного из двух 4-слойных модулей, собранных в 8-слойный модуль, затем через дрейфовые трубки во внутренний газовый объем и далее через восемь пластиковых соединительных элементов во внутренний объем второго 4-слойного модуля, откуда

проходит через трубки в обратном направлении, попадая во внешний газовый объем другого модуля.

Для сборки модулей в ПИЯФ был создан специальный участок. Помимо собственно механической сборки, процесс сборки включал подготовку деталей для сборки, промежуточные и финальные испытания модулей, по результатам которых для каждого модуля составлялся паспорт.

Каждая деталь, используемая для сборки модулей, полученная от производителя или изготовленная в ПИЯФ, проверялась на пригодность для сборки. Некоторые детали проходили через несколько этапов предварительной сборки, прежде чем использовались для сборки модулей (например, дрейфовые трубки, гибкие печатные платы, формованные структуры из каптона). На всех этапах сборки производился контроль качества.

Так как детектор TRT расположен в установке ATLAS между детектором SCT и жидкоаргоновым калориметром, его геометрические размеры жестко ограничены (с точностью  $\sim 100$  мкм). Критические размеры, такие как внутренний и внешний радиусы и толщина модуля, проверялись во время сборки и сравнивались со спецификацией.

Для проверки на герметичность собранные модули заполнялись аргоном с избыточным давлением 20 мбар. Величина утечки определялась путем измерения падения давления в модуле за достаточно большой период времени 4-8 часов. Модуль считался прошедшим испытания, если после применения температурных и объемных поправок утечка не превышала 1 мбар/бар в минуту.

Натяжение анодных проволок измерялось сразу после их установки в дрейфовые трубки, а также после окончания сборки модуля. Эти измерения повторялись и после доставки модулей в CERN. Контроль натяжения анодных проволок необходим для избежания нестабильностей работы дрейфовой трубки вследствие смещения анодной проволоки под действием силы тяжести, или электростатического смещения. Отклонение натяжения анодной проволоки от номинального значения может происходить из-за её проскальзывания после крепления путем обжимки (crimping) медной втулки. Все дрейфовые трубки с натяжением анодной проволоки менее 55 г, или уменьшением натяжения более чем на 5 г отсоединялись от электроники, предназначенной для съема сигнала. Для определения натяжения проволок использовалось устройство, с помощью которого механически возбуждались колебания анодной проволоки и при помощи емкостного считывания измерялась характерная частота колебания проволоки. Устройство для измерения натяжения анодных

проволок было разработано и произведено в ПИЯФ. В среднем не больше чем одна проволока из 3072 (4-слойный модуль) отсоединялась в связи с тем, что ее натяжение было вне спецификации.

На всех стадиях сборки для поиска и ремонта дефектных элементов проводились высоковольтные испытания модулей. После сборки двух 4-слойных модулей в 8-слойный проводился окончательный долговременный высоковольтный тест при напряжении 1480 В с использованием двухкомпонентной газовой смеси, содержащей 70% Ar + 30% CO<sub>2</sub>. Продолжительность такого теста составляла несколько недель. Темновой ток при таких испытаниях не должен превышать 150 нА для группы из ~200 дрейфовых трубок.

Все испытания модулей повторялись после их доставки в CERN до того, как они поступали на стадию окончательной сборки отдельных модулей в торцевую часть детектора, на которую устанавливалась электроника считывания сигналов.

## 6. Испытания модулей и критерии приемки

Строгие требования к качеству собранных модулей [6] следовали из необходимости обеспечения стабильной и надежной работы детектора TRT в течение многих лет функционирования коллайдера LHC. Необходимо было создать детектор, у которого количество неработающих каналов не превышает 1%, хотя, с точки зрения



Рис. 6. Вид 8-слойного модуля, подготовленного для теста на стенде WTS (Wheel Test Station) с радиоактивными источниками <sup>55</sup>Fe.

эффективности восстановления треков заряженных частиц, допускалось до 3% неработающих каналов. Для выполнения этой задачи все модули проходили через различные испытания и процедуры контроля качества. Тщательная проверка и анализ собираемых модулей позволяли устранять проблемы непосредственно в процессе производства.

Все характеристики собираемых модулей записывались в базу данных. В таких крупномасштабных проектах, как TRT, база данных необходима не только для простого учета сборочных компонент на складе, но и для документирования сложных результатов испытаний, для отслеживания причин неполадок детектора из-за особенностей процесса сборки. Даже через годы

работы детектора информация о партии использованных при сборке компонентов, а также об условиях окружающей среды во время испытаний может быть получена из базы данных.

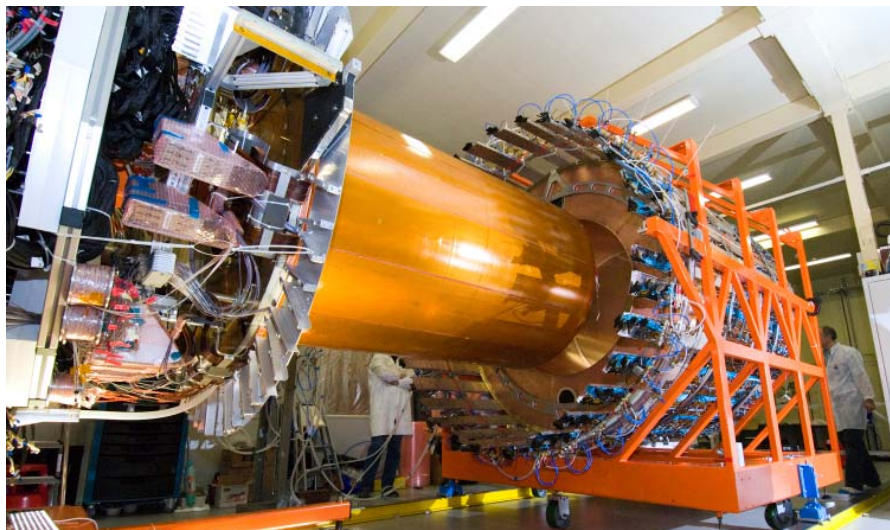
Проверка прямолинейности дрейфовых трубок или измерение смещения анодной проволоки по отношению к номинальному положению внутри дрейфовой трубки является наиболее важным из всех критериев приемки. При смещении анодной проволоки более чем на 400 мкм локальное увеличение электрического поля значительно изменяет коэффициент газового усиления. При этом значительно возрастает частота высоковольтных пробоев и растет количество высокоамплитудных сигналов, что делает работу дрейфовой трубки крайне нестабильной. Поэтому такие трубки должны отключаться от системы подачи высокого напряжения. Смещение анодной проволоки в дрейфовой трубке может происходить по нескольким причинам, например, из-за неправильного механического позиционирования анодной проволоки, изгиба или нецилиндричности дрейфовой трубки и т.д.

Измерение смещения анодной проволоки основано на измерении коэффициента газового усиления вдоль длины трубки. Измерения выполнялись для 8-слойного модуля, размещенного вертикально на специализированной установке Wheel Test Station (WTS), оборудованной набором радиоактивных источников <sup>55</sup>Fe (рис. 6).

Испытательный стенд WTS состоит из высокоточной механики для перемещения радиоактивных источников, электроники считывания информации с дрейфовых трубок, компьютерного управления, специализированного программного обеспечения и базы данных, в которой хранятся все измеренные спектры, вычисленные параметры спектров, а также информация о внешних условиях измерений (температура, влажность, параметры электроники и т.д.). ПИЯФ внес основной вклад в проектирование и создание этой установки.

Источники  $^{55}\text{Fe}$  установлены на шести рычагах разной длины. При автоматическом вращении рычагов каждый источник последовательно облучает все дрейфовые трубки. Таким образом измеряется амплитуда сигналов вдоль каждой отдельной трубки для шести положений источников. Трубки заполнены газовой смесью 70% Ar + 30% CO<sub>2</sub>. Для идеально прямой дрейфовой трубки с анодной проволокой, расположенной в её центре, амплитуды сигналов должны быть одинаковы для всех шести положений радиоактивных источников вдоль трубки. Используя калибровочные кривые изменения коэффициента газового усиления и изменения ширины фотопика в зависимости от изгиба дрейфовой трубки, можно получить информацию о смещении анодной проволоки. Калибровочные кривые были определены в экспериментах с контролируруемыми деформациями дрейфовых трубок. Изменение коэффициента газового усиления определяется как разница между максимальным и минимальным значениями амплитуды фотопика, отнесенная к максимальному значению. Дополнительная информация о форме фотопика дает возможность определить характер деформации трубки (изгиб, сжатие и т.д.). С учетом возможных неопределенностей было принято решение отключать трубки с изменением коэффициента газового усиления более 9%. Результаты испытаний сохранялись в базе данных и обобщались в так наз. электронных паспортах модулей.

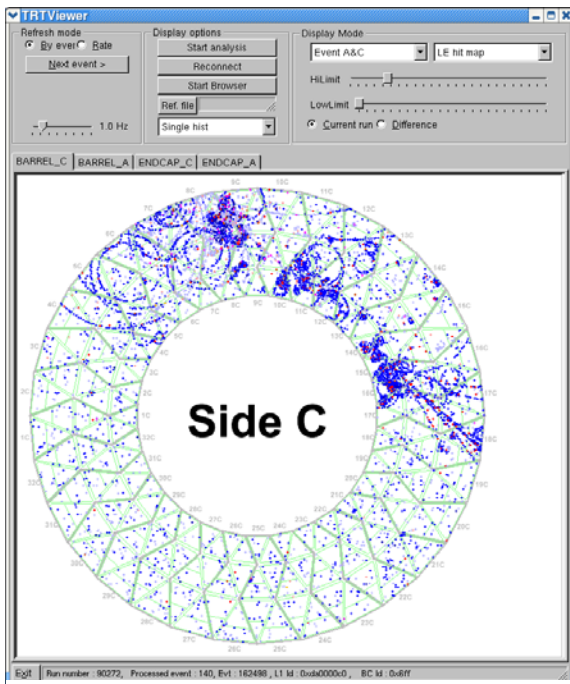
Все модули детектора TRT были собраны в заданные коллаборацией ATLAS сроки и с высоким качеством. Менее 0,1% каналов не работали после окончания сборки. После доставки в ЦЕРН модули детектора снова прошли испытания, и результаты испытаний оказались в полном соответствии с измерениями, сделанными ранее в ПИЯФ.



**Рис. 7.** Вид торцевой части детектора TRT во время интеграции с торцевой частью детектора SCT в ЦЕРН.

## 7. Ввод детектора TRT в эксплуатацию

В 2004–2006 гг. была произведена сборка всех торцевых модулей детектора TRT в единое целое – торцевые части детектора TRT (рис. 7). Перед окончательной установкой в шахту эксперимента ATLAS в начале 2007, детектор TRT был принят в качестве действующей системы, как отдельно, так и совместно с кремниевым стриповым детектором (SCT). Были проведены окончательные испытания электроники детектора, высоковольтной системы, системы охлаждения детектора, и проверена герметичность системы снабжения газовой смесью. Проводились сеансы набора данных от космического излучения, как в самостоятельном режиме, так и совместно с детектором SCT. Основной целью набора данных от космического излучения была проверка совместной работы детекторов SCT и TRT, чтобы выяснить их взаимное влияние друг на друга. Для представления и анализа данных с детектора TRT в ПИЯФ была разработана программа TRT Viewer. Данная



**Рис. 8.** Графический интерфейс программы TRT Viewer разработанной в ПИЯФ для отображения информации с детектора TRT.

программа позволяет отображать события, зарегистрированные детектором TRT, т.е. дрейфовые трубки, в которых были зарегистрированы сигналы при прохождении заряженных частиц, а также основные характеристики детектора. На рис. 8 показан графический интерфейс программы, на котором показано одно из событий, зарегистрированных детектором TRT во время набора космических данных. Хорошо видны треки от заряженных частиц, закручивающиеся в магнитном поле соленоида.

Физики ПИЯФ внесли ключевой вклад в создание программного обеспечения для моделирования работы детектора TRT с использованием пакета программ GEANT4, а также в создание и развитие алгоритмов для идентификации электронов с использованием информации с TRT детектора в рамках программного обеспечения эксперимента ATLAS.

## Литература

1. T. Akesson, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "The transition radiation tracker of the ATLAS experiment". IEEE Transactions, Nuclear Science **51**, 994 (2004).
2. M. Cappeans, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "Recent aging studies for the ATLAS transition radiation tracker". IEEE Transactions, Nuclear Science **51**, 960 (2004).
3. T. Akesson, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "ATLAS Transition Radiation Tracker test-beam results". Nucl. Instr. Meth. A **522**, 50 (2004).
4. T. Akesson, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "Operation of the ATLAS Transition Radiation Tracker under very high irradiation at the CERN LHC". Nucl. Instr. Meth. A **522**, 25 (2004).
5. T. Akesson, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "Status of design and construction of the Transition Radiation Tracker (TRT) for the ATLAS experiment at LHC". Nucl. Instr. Meth. A **522**, 131 (2004).
6. P. Cwetanski, O. Fedin, A. Khristachev, L. Kudin, S. Kovalenko, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, Yu. Ryabov, V. Schegelsky, D. Seliverstov, E. Spiridenkov, A. Zalite *et al.*, "Acceptance Tests and Criteria of the ATLAS Transition Radiation Tracker". IEEE Transactions, Nuclear Science **52**, 2911 (2005).

## Эксперимент LHCb

А.А. Воробьев, Н.Ф. Бондарь, Б.В. Бочин, С.С. Волков, Ан.А. Воробьев, В.Л. Головцов, С.А. Гец, Г.А. Городницкий, А.А. Жданов, А.П. Кашук, В.С. Козлов, З.Г. Кудряшова, В.И. Лазарев, В.Д. Лебедев, О.Е. Маев, Г.В. Макаренко, П.В. Неустроев, Н.Р. Сагидова, Э.М. Спириденков, Н.М. Степанова, В.И. Тараканов, О.Е. Федоров, А.Ю. Царегородцев

### 1. Введение

Задача эксперимента LHCb – детальное исследование нарушения  $CP$ -четности в разных модах распада  $B$ -мезона и поиск редких  $B$ -распадов, подавленных согласно Стандартной Модели. Эти исследования позволят проверить предсказания Стандартной Модели с высокой точностью и, возможно, обнаружат наличие «новой физики», находящейся за рамками этой модели. Сейчас основная информация в этой области исследований поступает с  $e^+e^-$ -коллайдеров. Это эксперименты BABAR на ускорителе SLAC (США) и BELLE на ускорителе КЕК (Япония). Важные результаты были недавно также получены в экспериментах CDF и D0 на Теватроне ( $1 \text{ ТэВ} + 1 \text{ ТэВ}$   $p\bar{p}$ -коллайдер) во FNAL (США). Как источник  $B$ -мезонов LHC значительно превзойдет возможности существующих  $e^+e^-$ -коллайдеров. Кроме того, будет производиться больше типов  $B$ -мезонов и  $B$ -барионов. Что касается CDF и D0, эти эксперименты имеют общую физическую направленность и не оптимизированы для изучения  $B$ -распадов. Эксперимент LHCb, ориентированный на  $B$ -физику, будет иметь серьезные преимущества перед экспериментами на Тэватроне (существенно меньший уровень фона, надежная идентификация частиц).

На начальной стадии формулирования физической программы для LHC были выдвинуты три предложения, направленные на изучение  $B$ -физики. Одно из них (SOBEX) предполагало использовать встречные протонные пучки, другие рассматривали два варианта фиксированной мишени. Ни одно из этих предложений не было одобрено комитетом LHC. Вместе с тем, трем коллаборациям было рекомендовано объединиться в одну и представить новый проект, нацеленный на использование встречных  $pp$ -пучков. Следуя этой рекомендации, вскоре была создана и приступила к разработке нового проекта коллаборация LHCb. За отправную точку был принят проект SOBEX. Группа ПИЯФ входила в состав коллаборации SOBEX и заняла активную позицию в развитии нового проекта. Эта группа, в частности, предложила радикальное изменение структуры SOBEX – замену магнитной системы, состоящей из большого квадрупольного магнита в комбинации с небольшим дипольным магнитом, на один широко-апертурный дипольный магнит. В основу этого предложения легла симуляция работы детектора с учетом фоновых условий. После горячих дискуссий это предложение было принято коллаборацией. Letter of Intent было представлено в августе 1995 года и утверждено LHC комитетом [1]. После этого группа ПИЯФ сосредоточила свои усилия на создании мюонной системы LHCb.

### 2. Детектор LHCb

Техническое Предложение (ТП) эксперимента LHCb было утверждено в сентябре 1998 года [2]. Детектор был спроектирован как одноплечевой спектрометр, перекрывающий углы от 10 мрад до 300 (250) мрад в отклоняющей (не отклоняющей) плоскости. Выбор геометрии детектора определился тем, что при высоких энергиях оба рожденных в столкновении кварка ( $b\bar{b}$ ) преимущественно испускаются в одном и том же угловом конусе. Поскольку сечение рождения  $b\bar{b}$ -пар при энергиях LHC очень велико, эксперимент LHCb будет использовать пониженную светимость  $2 \times 10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , производя тем не менее беспрецедентное количество  $b\bar{b}$ -пар ( $10^{12}$  за год). Это позволит изучать редкие каналы  $B$ -распада при условии их хорошего выделения из фоновых реакций.

Стратегия эксперимента LHCb была сформулирована следующим образом:

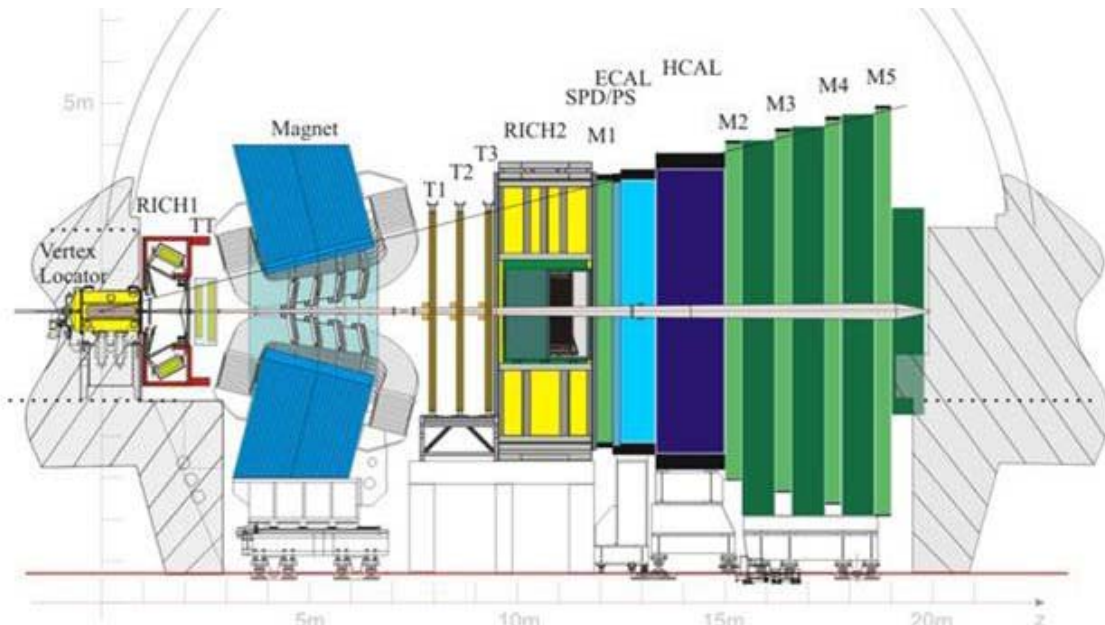
- надежная идентификация частиц,
- высокая точность вертексного детектора,
- высокое импульсное разрешение для заряженных частиц,
- эффективный триггер для выбранных каналов  $B$ -распада,
- отбор банчей только с одним взаимодействием.

Эти особенности должны сделать детектор LHCb уникальной установкой для будущей  $B$ -физики.

Детектор LHCb включает в себя широкоапертурный магнит, вертексную систему, трековую систему, два черенковских счетчика RICH1 и RICH2, электромагнитный калориметр с предварительным детектором ливней, адронный калориметр и мюонную систему. Он занимает пространство в 20 м по направлению пучка. Одним из важных параметров детектора является количество вещества на пути частиц до их входа в калориметр. Это вещество ограничивает возможности регистрации электронов и фотонов, увеличивает многократное рассеяние заряженных частиц, увеличивает загрузку трековых станций. К сожалению, после завершения Технического Проекта к концу 2001 года выяснилось, что количество вещества на пути частиц в детекторе LHCb в 1,5 раза выше предполагавшегося в Техническом Предложении. С другой стороны, было показано, что это вещество может быть уменьшено до требуемой Техническим Предложением величины реоптимизацией некоторых детекторных систем без ухудшения основных параметров детектора.

На рис. 1 приведена схема реоптимизированного LHCb детектора. Сохранена принципиальная компоновка из Технического Предложения. Основные изменения сделаны в числе трековых станций (4 станции вместо 11), в числе станций вертексного детектора (21 вместо 25), в толщине Si-детекторов (270 мкм вместо 300 мкм) и в числе детектирующих плоскостей первой мюонной станции M1 (две плоскости вместо четырех). Кроме того, уменьшено количество вещества в RICH1 (вследствие замены материала зеркального покрытия) и в пучковой трубе (вследствие замены  $Be-Al$  сплава бериллием во всех секциях вплоть до калориметров). В итоге, количество вещества перед детектором RICH2 теперь составляет 20-30% от радиационной длины  $X_0$  и 12% от длины ядерного взаимодействия  $\lambda_I$ . Соответствующие значения в ТП: 40% от  $X_0$  и 10% от  $\lambda_I$ .

Проект реоптимизированного детектора LHCb был утвержден в 2003 году [3].



**Рис. 1.** Схема реоптимизированного детектора LHCb, показывающая вертексный детектор VELO, дипольный магнит, черенковские детекторы RICH1 и RICH2, трековые станции TT, T1, T2, T3, сцинтилляционный падовый детектор SPD, предливневый детектор PS, электромагнитный калориметр ECAL, адронный калориметр HCAL и пять мюонных станций M1-M5.



### 3. Участие ПИЯФ в создании Мюонной системы ЛНСб

#### 3.1. Мюонная система ЛНСб. Структура и принцип работы

Мюонная система выполняет две функции: идентификацию мюонов и выработку мюонного триггера первого уровня. Она также должна обеспечить сопряжение реконструированной траектории мюона с траекторией частицы в трековой системе для точного определения импульса мюона. Принципы работы мюонной системы были сформулированы группой ПИЯФ в 1997 году [4]. Было показано, что мюонная система может самостоятельно вырабатывать триггер, используя только информацию с мюонных камер. Проект Мюонной системы был сформулирован в Мюонном TDR [5]. Мюонная система имеет продольно сегментированный поглотитель для поглощения адронов, фотонов и электронов. В элементы поглотителя входят ECAL, HCAL и четыре железных стены. Общий вес железной защиты – 1800 тонн. Рис. 1 показывает расположение пяти мюонных станций M1-M5. Мюонная станция M1 помещена перед калориметром ECAL. Станции M2-M4 установлены в 40 см промежуток между железными стенами на подвижных платформах (см. рис.2). Внутренний и внешний аксептансы Мюонной системы (горизонтальный и вертикальный) составляют 25 мрад × 15

мрад и 294 мрад × 250 мрад, соответственно. Чувствительная зона мюонных станций меняется от 42 м<sup>2</sup> (M1) до 106 м<sup>2</sup> (M5).

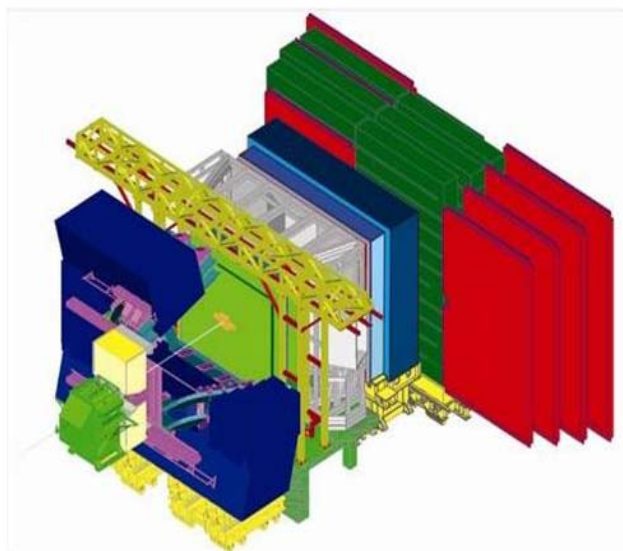


Рис. 2. Изображение детектора ЛНСб. Мюонные станции M2-M3 (красный цвет) могут выдвигаться в стороны от линии пучка для обеспечения доступа. На рисунке изображена правосторонняя часть детекторов в положении технического обслуживания.

Как было предложено в работе [4], определение трека мюона начинается с детектирования хита в станции M3. Затем ищутся хиты в других станциях в «зоне интереса» вблизи линии, соединяющей хит в M3 с точкой взаимодействия. Окончательно мюонная траектория восстанавливается с использованием хитов в M2 и M1, тогда как хиты в других станциях помогают снизить фон. Определенная таким образом мюонная траектория прослеживается назад в точку взаимодействия. Отклонение выстроенной траектории от точки взаимодействия (impact parameter) характеризует поперечный импульс мюона  $p_t$ . Мюонный триггер отбирает события с величиной  $p_t$ , большей предустановленного значения (~1,5 ГэВ/c). Согласно данным симуляции, такой триггер может обеспечить 40% эффективность для событий  $B \rightarrow \mu$  с фактором подавления фоновых событий ~100. В описанном выше методе восстановления траектории мюона используется информация от станции M1, расположенной перед ECAL и находящейся в наиболее жестких фоновых условиях. Однако, в случае возникновения проблем в M1, мюонная траектория может быть определена по хитам в M2 и M3. Качество мюонного триггера в этом случае остается удовлетворительным: ~30% эффективность регистрации событий  $B \rightarrow \mu$  при том же факторе подавления фоновых событий. Описанный алгоритм применен в Мюонной Триггерной Системе первого уровня, вырабатывающей триггерный сигнал в интервале 3 мкс после взаимодействия.

### 3.2. Выбор технического решения мюонного детектора

В Мюонной Системе серьезной проблемой является высокий уровень фона. Наши расчеты по моделированию фона с использованием программы GCALOR [6] показали, что потоки заряженных частиц в станции M1 меняются от 200 кГц/см<sup>2</sup> в области вблизи пучковой трубы до 10 кГц/см<sup>2</sup> во внешней области. Фоновая загрузка в станциях M2-M5 ниже почти на два порядка, но все-таки очень высока. Такой высокий уровень фона в значительной степени определяет выбор технического решения детектора. Детектор должен быть быстродействующим и радиационнотойким. Алгоритм триггерирования требует очень высокой эффективности во всех мюонных станциях. Для надежной привязки к моменту пересечения пучков она должна быть 99% в 20 нс окне. С другой стороны, пространственное разрешение мюонных детекторов может быть достаточно скромным, определяемым диффузией мюонного трека вследствие кулоновского рассеяния в железной защите. Для удовлетворения этих требований была выбрана падовая структура с прямоугольными падами. Размеры падов в каждой станции определялись исходя из того, что конфигурация падов в M1-M5 проецируется в точку взаимодействия. Каждая станция разбита на четыре региона, R1-R4, с различными размерами падов. Рассматривались разные технические решения для детекторов мюонных станций. Группа ПИЯФ предложила использовать специально разработанные быстродействующие мюонные камеры с анодными и/или катодными падами. Альтернативными технологиями являлись так называемые узко-зорные камеры (TGC) и резистивные плоские камеры (RPC). После всесторонних исследований, LHCb коллаборация выбрала предложенные ПИЯФ мюонные камеры для всей мюонной системы, за исключением небольшого, но особенно “горячего” региона R1 станции M1, где будут использованы детекторы GEM.

Были предложены камеры прямоугольной геометрии с чувствительной областью  $S = H \times L$ , где высота камеры  $H$  меняется в пределах от 20 см (M1, R1-R4) до 31 см (M5, R1-R4) и длина камеры  $L$  – от 24-37 см (R1, M1-M5) до 96-150 см (R4, M1-M5). Важной отличительной особенностью этого проекта является одинаковая высота камер для всех регионов внутри одной станции. Это позволяет использовать «лестничную структуру» и избежать таким образом трудностей в межрегионных пограничных областях. Такая структура изображена на рис. 3 и 4.

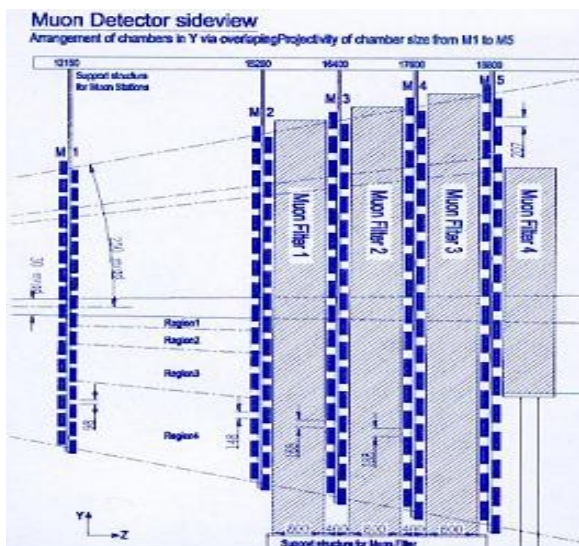


Рис. 3. Мюонная система, вид сбоку в плоскости YZ.

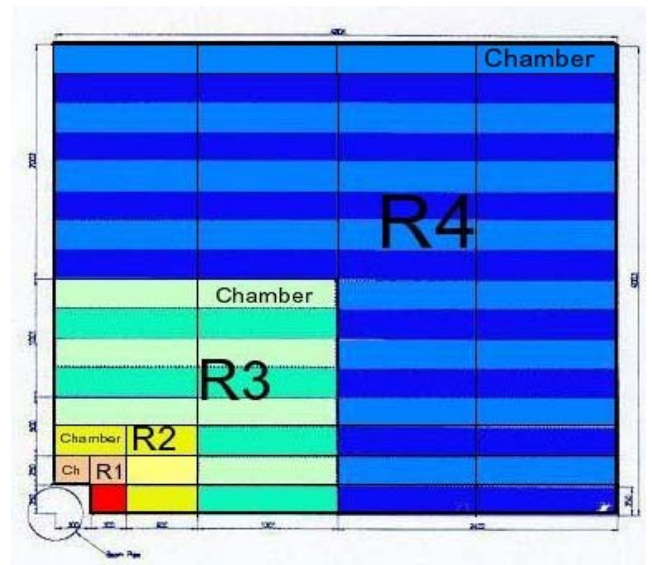


Рис. 4. Правый верхний квадрант станции M2, вид в плоскости XY. Регионы R4, R3, R2 и R1 окрашены, соответственно, голубым, зеленым, желтым и красным цветом.

Проволочные камеры имеют симметричные секции со следующими параметрами:

- анод-катодное расстояние – 2,50 мм,
- диаметр анодной проволоки – 30 мкм,
- шаг анодных проволок – 2,0 мм.

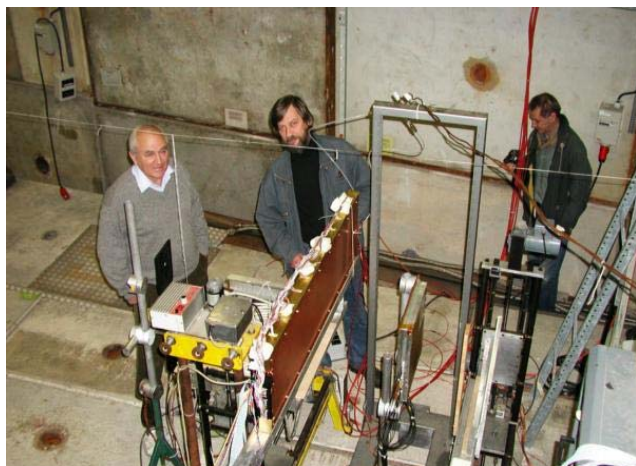
Проволока намотана вдоль короткой стороны камеры в вертикальном (Y) направлении. В регионе R4 длина проволок совпадает с требуемым размером пада в направлении Y. Поэтому проволочные анодные пады в этих регионах были образованы объединением нескольких проволок в один считываемый канал. К примеру, в регионе M3R4 размер проволочного пада –  $54 \times 270 \text{ мм}^2$ . В других регионах использовались катодные пады, размеры которых уменьшены в обоих измерениях на фактор 2 (регион R3), 4 (регион R2) и 8 (регион R1). Размер пада постоянен внутри каждого региона. Каждая камера в станциях M2-M5 состоит из четырех детектирующих слоев, соединенных попарно, образуя таким образом две двухслойные камеры. Такая многослойная структура помогает удовлетворить требованиям быстродействия и высокой эффективности регистрации. Она также должна обеспечить достаточный запас надежности Мюонной Системы, рассчитанной на многолетнюю работу. Заметим, однако, что станция M1 содержит только камеры с двумя слоями вследствие ограничений на количество вещества в этой станции.

### 3.3. Исследование прототипов мюонных камер

В 1988–2002 годах серия прототипов мюонных камер (в общей сложности 10) были созданы в ПИЯФ и испытаны на пионном пучке в ЦЕРН [7] – см. рис. 5. Эти исследования позволили оптимизировать геометрические параметры мюонных камер, состав газовой смеси и параметры считывающей электроники. Было также выполнено моделирование работы мюонной камеры.

После изучения различных газовых смесей была рекомендована смесь  $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$  (40:50:10). Эта газовая смесь обеспечивает высокую скорость дрейфа электронов ( $\sim 100 \text{ мкм/нс}$ ), повышенную стабильность к разрядам и хорошие параметры старения. Заметим, что эти исследования выполнялись в камерах с шагом намотки проволок 1,5 мм. В результате этих работ были сделаны следующие заключения.

- Одна двухслойная камера обеспечивает требуемую 99% эффективность в 20-нс временном окне в диапазоне высокого напряжения от  $NV = 3,15 \text{ кВ}$  до  $NV = 3,35 \text{ кВ}$ . При использовании двух таких камер 99% эффективность достигается, начиная с  $NV = 2,95 \text{ кВ}$ .
- Газовое усиление при  $NV = 3,15 \text{ кВ}$  около  $10^5$ . Наблюдаемый разброс К.Г.У. по площади всей камеры был в пределах  $\pm 20\%$  (эквивалентно  $\pm 30 \text{ В}$  изменениям в  $NV$ ).
- Камеры могут работать при высокой интенсивности пучка (до 150 кГц на пад) без ухудшения эффективности регистрации.
- Измеренная вероятность взаимной наводки в двух соседних падах оказалась менее 10% при  $NV \leq 3,2 \text{ кВ}$ .



**Рис. 5.** Один из созданных в ПИЯФ прототипов мюонных камер на тестовом пучке T11 в ЦЕРН. В общей сложности, 10 прототипов мюонных камер было создано в ПИЯФ и протестировано на 3 ГэВ пионном пучке в ЦЕРН. Результаты этих работ были решающими при выборе предложения по конструкции детектора для Мюонной Системы детектора LHCb.

Эти результаты говорили о том, что разработанные мюонные камеры отвечают требованиям эксперимента с избыточностью, которую даже признали излишней. Поэтому коллаборация приняла решение об изменении расстояния между проволоками с 1,5 мм до 2,0 мм, снижая таким образом стоимость и упрощая сборку. Дальнейшие испытания показали, что рабочие характеристики камеры не претерпели заметного ухудшения. После этого технология производства камер была зафиксирована и началось сооружение Мюонной Системы.

### 3.4. Производство мюонных камер в ПИЯФ

Мюонная Система ЛНСб в целом содержит 1380 мюонных камер, 600 из которых должны были быть собраны в ПИЯФ. Это четырехслойные камеры с анодными падами для региона R4 в станциях M2, M3 и M4. Они покрывают 75% общей площади этих станций (рис. 4). Рабочая область каждой камеры –  $120 \times 25 \text{ см}^2$  для M2R4,  $130 \times 27 \text{ см}^2$  для M3R4 и  $140 \times 29 \text{ см}^2$  для M4R4. В общей сложности они содержат около 1,5 миллиона анодных проволок. Согласно техническим требованиям равномерность газового усиления по площади камеры должна быть в пределах  $\pm 30\%$ . Это накладывает ограничения на допустимые погрешности в величине зазора ( $5,0 \pm 0,1 \text{ мм}$ ), в шаге анодных проволок ( $2,0 \pm 0,1 \text{ мм}$ ), в натяжении анодных проволок ( $65 \pm 5 \text{ грамм}$ ).

В целях уменьшения стоимости была принята безрамная конструкция камер. Плоскости камеры склеены между собой, что делает конструкцию неразборной. Это требует надежной технологии с контролем на каждом этапе сборки камеры. Такая технология была разработана в ПИЯФ и утверждена коллаборацией после оценки готовности к производству (Production Readiness Review) 30 января 2004 года. Затем была начата сборка камер в специально подготовленном монтажном комплексе («фабрика» PNPI-1). С середины 2005 года к производству подключился второй комплекс («фабрика» PNPI-2). В этом проекте принимало участие более 40 специалистов ПИЯФ. Для работы была подготовлена чистая зона площадью  $800 \text{ м}^2$ . Оба производства были оснащены специализированным оборудованием: шесть столов для приклейки баров, две автоматизированные намоточные машины, автоматизированная машина для припайки проволок, две машины для контроля натяжения проволок и зазора между проволоками, два рентгеновских тестовых стенда, различное тестовое оборудование. Это оборудование было спроектировано и изготовлено совместными усилиями групп ПИЯФ и ЦЕРН. Была достигнута беспрецедентная скорость производства – по одной камере в день на каждой «фабрике». К концу 2006 года были собраны и протестированы все 600 камер. Согласно результатам тестов все камеры отвечали техническим требованиям. Некоторые из этапов изготовления мюонных камер в ПИЯФ иллюстрируются рис. 6-13.



Рис. 6 Устройство для прецизионной приклейки баров к панелям.



Рис. 7. Автоматизированная намотка анодных проволок.



**Рис. 8.** Автоматическая пайка анодных проволок.



**Рис. 9.** Автомат для измерения натяжения анодных проволок и расстояния между ними.



**Рис. 10.** Пайка навесных элементов.



**Рис. 11.** Герметизация камеры.



**Рис. 12.** Первая изготовленная камера готовится к испытаниям на тест-стенде.



**Рис. 13.** Участники группы PNPI-2 перед контейнерами с последними мюонными камерами, собранными в ПИЯФ и приготовленными к перевозке в ЦЕРН 20 ноября 2006 г.

### 3.5. Тестирование мюонных камер в ЦЕРН и их установка в Мюонную Систему

К концу 2006 года все собранные и испытанные в ПИЯФ мюонные камеры были перевезены в ЦЕРН. В ЦЕРН тесты на газовые утечки и высоковольтные тесты были повторены. После этого все камеры были помещены в зону хранения с постоянной продувкой сухим азотом. Позднее на них установили электростатические экраны, линии низкого и высокого напряжения и считывающую электронику. После этого камеры прошли заключительный “предустановочный” тест на специальном стенде космического излучения. Отдельные камеры проверялись также на установке GIF (CERN) на облучение большими потоками  $\gamma$ -излучения. Результаты всех проведенных в ПИЯФ и в ЦЕРН испытаний заносились в базу данных, доступную через Интернет всем участникам коллаборации (рис. 14).



**Рис. 14.** Для представления всех результатов тестирования на сервере базы данных в ЦЕРН (CERN Oracle Data base Server) было разработано специальное Web-приложение. Эта база данных содержит полную информацию по тестам камер на всех стадиях от начала производства до установки в Мюонную Систему LHCb.

По завершении предустановочных тестов камеры были отправлены в шахту LHCb для установки в Мюонную Систему. Сама установка потребовала огромных усилий со стороны группы ПИЯФ. Эта процедура включала в себя подготовку газовых магистралей, разводку высоко- и низковольтных напряжений, считывающих кабелей, крепление камер в Мюонных Станциях, выстройку камер, газовые тесты на утечки, тесты считывающей электроники. С середины 2006 года группа из 10 сотрудников ПИЯФ участвовала в этой работе. Установка и ввод в действие мюонных камер были завершены к концу 2007 года и была начата подготовка Мюонной Системы к физическим измерениям.

Рис. 15–20 иллюстрируют некоторые этапы тестирования мюонных камер в ЦЕРН и их установку в Мюонную Систему LHCb.

### 3.6. Изготовление в ПИЯФ запасных мюонных камер

В 2007 году коллаборация LHCb приняла решение об изготовлении комплекта запасных мюонных камер. В соответствии с этим решением, в течение 2008 года в ПИЯФ были изготовлены дополнительно 60 мюонных камер для станций M2R4, M3R4, M4R4. К маю 2009 года все камеры были доставлены в ЦЕРН, укомплектованы электроникой и испытаны на стенде космического излучения. Результаты испытаний показали высокое качество изготовленных камер. Все камеры находятся в зоне хранения в состоянии постоянной готовности к немедленной установке в Мюонную Систему LHCb.



**Рис. 15.** Мюонные камеры в контейнерах после прибытия в ЦЕРН.



**Рис. 16.** Мюонные камеры в зоне хранения перед заключительными испытаниями.



**Рис.17.** Подготовка мюонных камер к испытаниям. Установка прикамерной электроники.



**Рис. 18.** Испытания мюонных камер на стенде космического излучения.



**Рис. 19.** Монтаж мюонных камер в Мюонной Системе ЛНСб.



**Рис. 20.** Группа ПИЯФ, принимавшая участие в монтаже Мюонной Системы ЛНСб.

### 3.7. Разработка и изготовление многоканальной высоковольтной системы для мюонного детектора LHCb

В Мюонную Систему LHCb входят 1380 мюонных камер с примерно 5000 детектирующих слоев. Для большей надежности было бы важно иметь независимый высоковольтный источник (до 3 КВ) для каждого слоя. Однако рыночная стоимость такой многоканальной высоковольтной системы оказалась неприемлемой для коллаборации LHCb. Значительно менее дорогая HV-система на 11 000 каналов была сконструирована совместными усилиями ПИЯФ и Университета Флориды для детектора CMS. Коллаборация LHCb предложила ПИЯФ создать подобную HV-систему для большей части Мюонного детектора LHCb (4 000 каналов). ПИЯФ принял это предложение, учитывая критическую ситуацию с созданием HV-системы в мюонном детекторе, хотя это и не входило в наши первоначальные обязательства. На первой стадии было решено произвести систему на 2 000 каналов, с дальнейшим увеличением до 4 000 каналов. Разработанная HV-система обеспечивает в каждом канале контроль напряжения с точностью 1 в и контроль тока с точностью 2 нА (для тока <math><1 \mu\text{кА}</math>) и 100 нА (для тока >math>>1 \mu\text{кА}</math>). Максимальный ток в одном канале 100 мкА. В 2007 году в ПИЯФ был создан 108-канальный прототип высоковольтной системы LHCb. В 2008 году была изготовлена и доставлена в ЦЕРН 2000-канальная HV-система, обеспечившая своевременный запуск Мюонной Системы LHCb. На рис.21 представлена блок-схема этой высоковольтной системы.

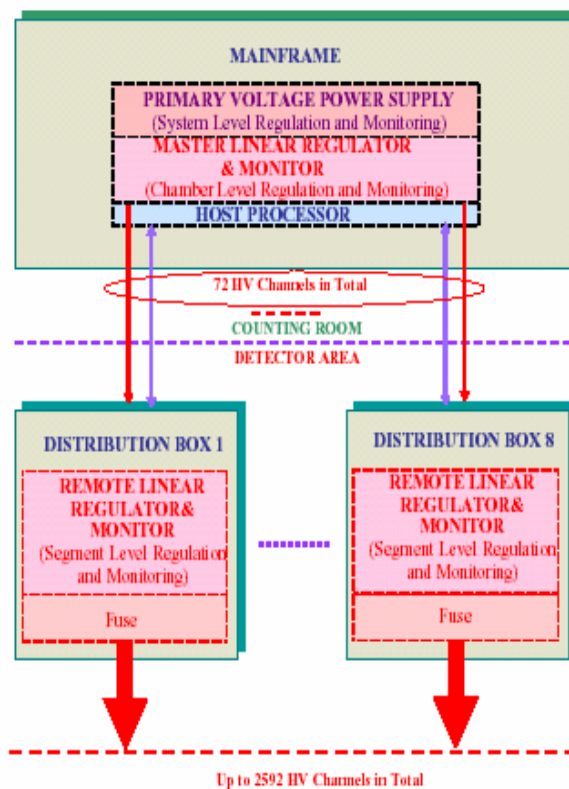


Рис. 21. Блок-схема высоковольтного источника питания для мюонного детектора LHCb.

### Литература

1. LHCb – Letter of Intent, CERN/LHCC 95-5, August 1995.
2. LHCb – Technical Proposal, CERN/LHCC 98-4, LHCC/P4, February 1998.
3. LHCb Reoptimized Detector Design and Performance Technical Design Report, CERN/LHCC 2003-30, LHCb TDR9, 9 Sept. 2003.
4. M. Borkovsky, A. Tsaregorodtsev and A. Vorobyov, “Study of the LHCb Muon Trigger”. LHC-B 97-007 TRIG, 199;  
M. Borkovsky, G. Gorti, B. Cox, A. Tsaregorodtsev, K. Nelsen and A. Vorobyov, “The LHCb Level 0 Muon Trigger”. LHCb 98-002 TRIG/MUON.
5. LHCb Muon System. Technical Design Report, 28 May 2001.
6. N. Sagidova, A. Tsaregorodtsev and A. Vorobyov, “Study of Background in LHCb detector”. LHC-B 97-009 EXPT; LHC-B 97-011 EXPT; LHC-B 97-012 EXPT; LHCb 98-059 EXPT.
7. B. Bochyn, S. Guets, V. Lazarev, N. Sagidova, E. Spiridenkov, An. Vorobiev and A. Vorobyov, “Beam tests of Wire Pad Chambers for LHCb Muon System”. LHCb 2000-003 MUON, 14 Feb. 2000; LHCb 2000-102 MUON, 24 Oct. 2000; LHCb 2001-025 MUON, 28 March 2000; LHCb 2002-025 MUON, 19 April 2000.



## Эксперимент ALICE

В.М. Самсонов, В.А. Евсеев, М.Б. Жалов, В.В. Иванов, Е.Л. Крышень, Н.М. Мифтахов, В.Н. Никулин, В.В. Поляков, Е.В. Рощин, В.И. Рязанов, О.П. Тарасенкова, А.В. Ханзадеев

### 1. Введение

Современные модели ранней Вселенной, Стандартная Модель сильных и электрослабых взаимодействий в совокупности с большим объемом астрофизических данных свидетельствуют о том, что в первые микросекунды после Большого Взрыва материя во Вселенной представляла собой сверхплотное состояние кварк-глюонного вещества при экстремально высоких температурах. Создание этого экстремального состояния материи в лабораторных условиях и исследование его свойств признано одной из наиболее фундаментальных проблем современной физики. Предсказанный теорией сильных взаимодействий, Квантовой Хромодинамикой (КХД), быстрый рост сечений жестких адронных процессов и резкое возрастание плотности низкоэнергетических глюонов в нуклонах с увеличением энергии взаимодействующих частиц позволяет рассчитывать, что в микрообъеме подобное состояние ядерного вещества может быть создано при центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов.

С запуском в ЦЕРН Большого Адронного Коллайдера (LHC) появляется возможность изучать столкновение ядер с рекордно высокими энергиями, около 2750 ГэВ/нуклон. Эксперимент ALICE, объединяющий усилия 112 научных учреждений из 28 стран, посвящён всесторонним исследованиям физики экстремального состояния ядерного вещества при сверхвысокой температуре и плотности энергии.

Конструкция детектора ALICE была оптимизирована для изучения столкновений тяжелых ядер при энергиях порядка нескольких ТэВ на нуклон.

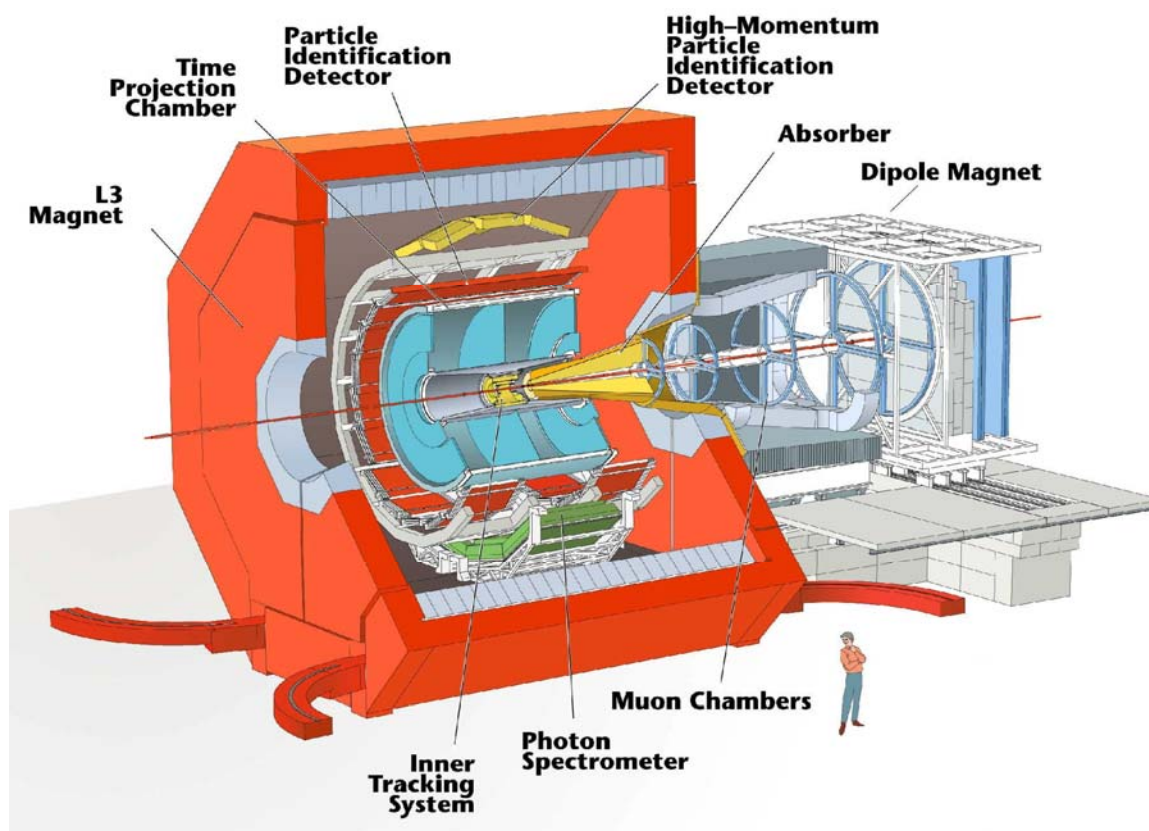


Рис. 1. Внешний вид детектора ALICE. Мюонный спектрометр изображен с правой стороны рисунка

В детекторе предусмотрена идентификация адронов, электронов, фотонов и мюонов, которые рождаются в этих столкновениях. Одним из характерных свойств таких столкновений является высокая множественность – до нескольких тысяч частиц в единице быстроты на событие, что требует высокой гранулярности детекторных подсистем. Детектор ALICE состоит из центральной (баррельной) части, которая расположена внутри большого соленоидального магнита (магнит L3), и мюонного спектрометра, расположенного в области углов  $171^\circ < \Theta < 177^\circ$  (рис. 1).

Баррельная часть состоит из внутренней трековой системы, основанной на кремниевых детекторах, времяпроекционной камеры, системы идентификации частиц (состоящей из времяпролетного детектора, детектора переходного излучения и детектора черенковского излучения RICH) и фотонного спектрометра, основанного на сцинтилляционных кристаллах  $PbWO_4$ . Также есть несколько детекторов, расположенных под малыми углами к пучку (не показаны на рис. 1): калориметр под нулевым углом, детектор множественности частиц, летящих под малыми углами, стартовый детектор, который также используется для определения вершины столкновения, детектор для определения центральности, электромагнитный калориметр.

В период создания детектора ALICE ПИЯФ был одним из основных участников коллаборации, ответственных за разработку мюонного спектрометра. Спектрометр состоит из большого дипольного магнита, поглотителей, пяти трековых станций, мюонного фильтра и триггерных камер. Он предназначен для изучения тяжелых кваркониев  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\Upsilon$ ,  $\Upsilon'$ ,  $\Upsilon''$  по их распаду на мюонные пары. Разрешение по массе составляет 100 МэВ при энергии 10 ГэВ, что достаточно для разрешения тонкой структуры  $\Upsilon$  резонансов.

Одним из приоритетных пунктов физической программы группы ПИЯФ в эксперименте ALICE является исследование процессов фоторождения векторных мезонов в ультрапериферических протон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях и изучение поляризационных эффектов в рождении тяжелого кваркония в адронном взаимодействии. При исследовании этих процессов будут использоваться уникальные особенности мюонного спектрометра – высокое разрешение по массе и возможность настройки различных триггерных сигналов. Незначительные модификации стандартного алгоритма триггера позволят реализовать отбор событий ультрапериферического взаимодействия и, следовательно, извлечь из данных новую и исключительно ценную информацию о поведении глюонной плотности в нуклонах и ядрах при малых  $x$ .

## 2. Трековые станции мюонного спектрометра

### 2.1. Устройство трековых станций

Необходимое разрешение по массе исследуемых кваркониев в эксперименте обеспечивается точностью измерения импульсов мюонов по отклонению их траекторий, измеряемых трековой системой мюонного спектрометра, в известном поле дипольного магнита. Соответственно трековые станции должны удовлетворять нескольким ключевым требованиям:

- Трековые детекторы должны иметь малую радиационную длину, чтобы не вызывать существенного искажения траекторий мюонных треков из-за многократного кулоновского рассеяния (среднее значение  $X/X_0$  для станции составляет менее 3%).
- Они должны работать в условиях высокой плотности потока регистрируемых частиц (до 0.01 частиц на  $см^2$  в каждом событии).
- Пространственное разрешение ( $\sigma$ ) трековых детекторов должно быть не хуже 100 мкм в плоскости изгиба трека магнитным полем и не хуже 1 мм в перпендикулярной плоскости.

Трековые станции покрывают большую чувствительную область (до  $5 \times 5 м^2$ ).

В соответствии с предложениями группы ПИЯФ [1] в качестве детекторов мюонов были выбраны многопроволочные пропорциональные камеры с падовой структурой катодов (СРС).

Задние трековые станции (станции 3, 4 и 5), в создании которых принимал участие ПИЯФ, имеют модульную структуру и состоят из перекрывающихся прямоугольных СРС модулей. Длина модулей варьируется от 80 до 240 см, высота равна 40 см.

На основе результатов тестирования нескольких созданных прототипов СРС была разработана технология сборки камер. Основу СРС составляют два сэндвича сотовой структуры в обкладках из углепластика, на которых наклеены печатные платы катодов. Сегментация катодов (длина падов) варьируется в зависимости от ожидаемой плотности треков. Плоскости анодов изготовлены из вольфрамовой (без золотого покрытия) проволоки диаметром 18 мкм. Анодные проволоки фиксируются с помощью эпоксидного клея между спейсерами (толщиной 2,5 мм каждый) из диэлектрика. Все материалы были тщательно подобраны, чтобы минимизировать процессы старения детектора. Карты электроники размещены на периферийной части модулей.

В процессе сборки модулей осуществлялся поэтапный контроль качества. Для этого в ПИЯФ были разработаны специальные устройства. Особое внимание уделялось соответствию заданным требованиям параметров камер, отвечающих за однородность газового усиления (вариации по площади камеры коэффициента газового усиления находятся в пределах 15%), а именно, постоянству (в пределах  $\pm 100$  мкм) расстояния катод-анод и одинаковости (в пределах  $\pm 10$  г) натяжения анодных проволок.

Сборка 38 модулей СРС (четверть от общего числа) была выполнена в ПИЯФ. Для этих целей была подготовлена чистая сборочная комната, оснащенная специально разработанным оборудованием и тестовыми стендами.

## 2.2. Устройства для производства трековых станций

Группа ПИЯФ отвечала за разработку и изготовление устройств для производства модулей трековых станций. Устройство для обрезки печатных плат, стенд для высоковольтных испытаний, стенд для тестирования с помощью радиоактивных источников и приборы для измерения натяжения проволок были разработаны в ПИЯФ и предоставлены всем группам коллаборации, вовлеченным в производство трековых камер для станций 3-4-5 мюонного спектрометра.

### Устройство для обрезки печатных плат

Высокое пространственное разрешение требует позиционирования катодных плоскостей с точностью  $\pm 40$  мкм. Для этого было разработано устройство, с помощью которого края печатных плат обрезались, и проделывались специальные реперные отверстия. Типичное отклонение от линейности края составляет  $\pm 15$  мкм, а линия обрезки располагается по отношению к падам с точностью  $\pm 20$  мкм. Аналогичная точность была достигнута и для реперных отверстий. Этот прибор (см. рис. 2, слева) применялся для обработки всех печатных плат в трековых камерах 3, 4 и 5.

Упрощенная версия прибора (рис. 2, справа) была разработана и изготовлена в ПИЯФ и отправлена в институт Саха (Калькута, Индия), также участвующий в производстве СРС для трековых станций детектора ALICE. В этом случае технология сборки не требовала реперных отверстий, катодные пады выравнились благодаря высокой точности обрезки печатных плат. Этот прибор успешно применялся при изготовлении камер для второй станции.

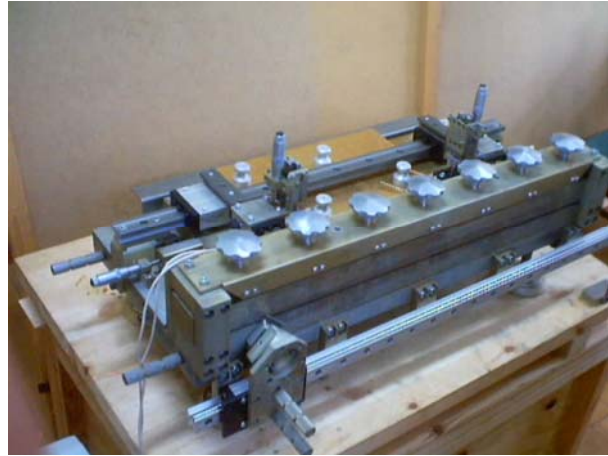


Рис. 2. Устройства обработки печатных плат, разработанные в ПИЯФ для станций 3, 4, 5 (слева) и для станции 2 (справа).

### Стенд для тестов с радиоактивным источником

Особое внимание было уделено проверке однородности газового усиления. Вариации газового усиления связаны с дефектами планарности катодных плоскостей, что приводит к ухудшению пространственного разрешения камер. Газовое усиление контролировалось путем измерения токов, наведенных в камерах от радиоактивного источника. Разработанный стенд (рис. 3) позволяет производить перемещения коллимированного источника вдоль чувствительной поверхности с одновременным измерением тока. Полученные неравномерности двумерного распределения коэффициента газового усиления не превышают 30% с типичным разбросом около 10% [2].

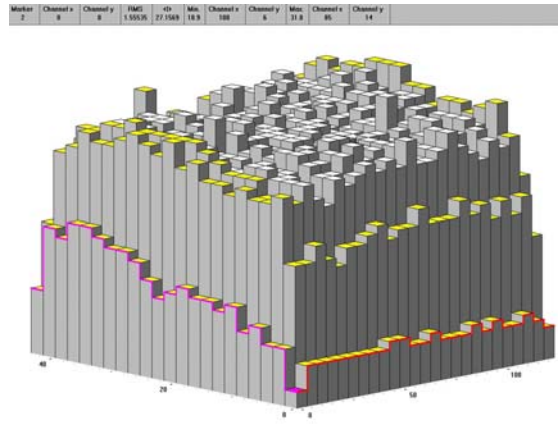
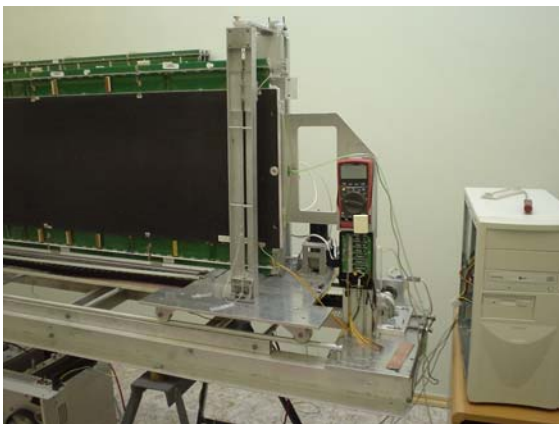


Рис. 3. Стенд для тестов с радиоактивным источником и пример распределения газового усиления в трековой камере.

### Стенд для высоковольтных испытаний

Стенд для тестирования камер при высоком напряжении был разработан для контроля качества проволочных плоскостей [3] перед сборкой модуля. Он представляет собой герметичную камеру с прозрачной крышкой (см. рис. 4). На крышке нанесены полупрозрачная катодная сетка и ограничители. Стенд оборудован пневматической системой, которая поднимает проволочную плоскость и прижимает ее к ограничителям на крышке. При этом воспроизводится геометрия электрического поля, близкая к геометрии в реальном детекторе. Стенд наполняется азотом, устойчивым к электрическому пробое. Прикладываемое высокое напряжение приводит к коронному

разряду вокруг анодных проволок. Свечение оказывается сильнее в тех местах, где существует аномально большое электрическое поле, например вокруг пылинок, заусенцев, плохо натянутых проволок. Таким образом дефекты камеры можно увидеть невооруженным глазом. Маленькие пылинки и заусенцы можно выжечь в течение 6-7 часов коронного разряда. Такие приборы были поставлены всем группам, участвовавшим в изготовлении трековых станций 3-4-5.



Рис. 4. Вид стенда для тестирования при высоком напряжении.

#### Измерение натяжения анодных проволок в трековых камерах

Полное число анодных проволок в трековой системе около 100 000. Все проволоки должны иметь достаточное натяжение, иначе система будет механически нестабильной по отношению к электростатическому отталкиванию. Для выбранных параметров проволок минимальное натяжение оценивается на уровне 17 грамм, в то время как предел упругости проволок составляет около 70 граммов. Номинальное натяжение проволок было выбрано на уровне 40 грамм. Чтобы гарантировать качество камеры, выполнялось измерение силы натяжения каждой проволоки. Были изготовлены два типа приборов. Первый прибор (см. рис. 5) был разработан для использования в процессе изготовления камер, а второй – для проверки полностью собранных камер. Оба прибора основаны на зависимости резонансной частоты от натяжения проволоки. Разница в устройстве приборов заключается в способе возбуждения проволок: в случае контроля в процессе производства используются электростатические импульсы, для контроля собранных камер используется легкий механический удар.

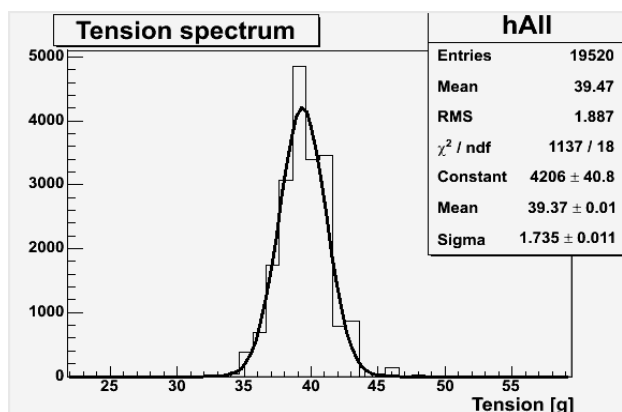


Рис. 5. Оборудование для измерения натяжения проволок и распределение натяжения, измеренное для примерно 20000 проволок в камерах, изготовленных в ПИЯФ.

Оба прибора могут измерять натяжение проволок с точностью  $\pm 0,5$  г за разумное время (около 20 минут на 80 проволок) [4]. Результаты измерений первого прибора были записаны в производственную базу данных. Второй прибор предназначен для использования во время пусконаладочных работ и периодических проверок в период остановки LHC.

### Результаты испытаний на пучке

Прототипы трековых камер были протестированы в ЦЕРН с использованием пионного пучка на ускорителе PS с импульсом 7 ГэВ/с и мюонного пучка на ускорителе SPS с импульсом 120 ГэВ/с. Набор из 10 кремниевых стриповых детекторов (с шагом 50 микрон) использовался для реконструкции параметров трека. Испытания на пучке были проанализированы несколькими группами. В результате независимо проведенных анализов получены согласованные результаты: распределение по пространственному разрешению имеет узкую компоненту с сигмой около 70 микрон на ускорителе PS и 50 микрон на SPS (разница связана с многократным рассеянием) с эффективностью 96% (неэффективность связана с хвостами распределения). Особенности анализа группы ПИЯФ [5] являются разработка процедуры чтения/декодирования, использование нескольких новых методов извлечения координат трека, параметризации реалистичного распределения остаточных отклонений (см. рис. 6), и параметризации угловой зависимости разрешения.

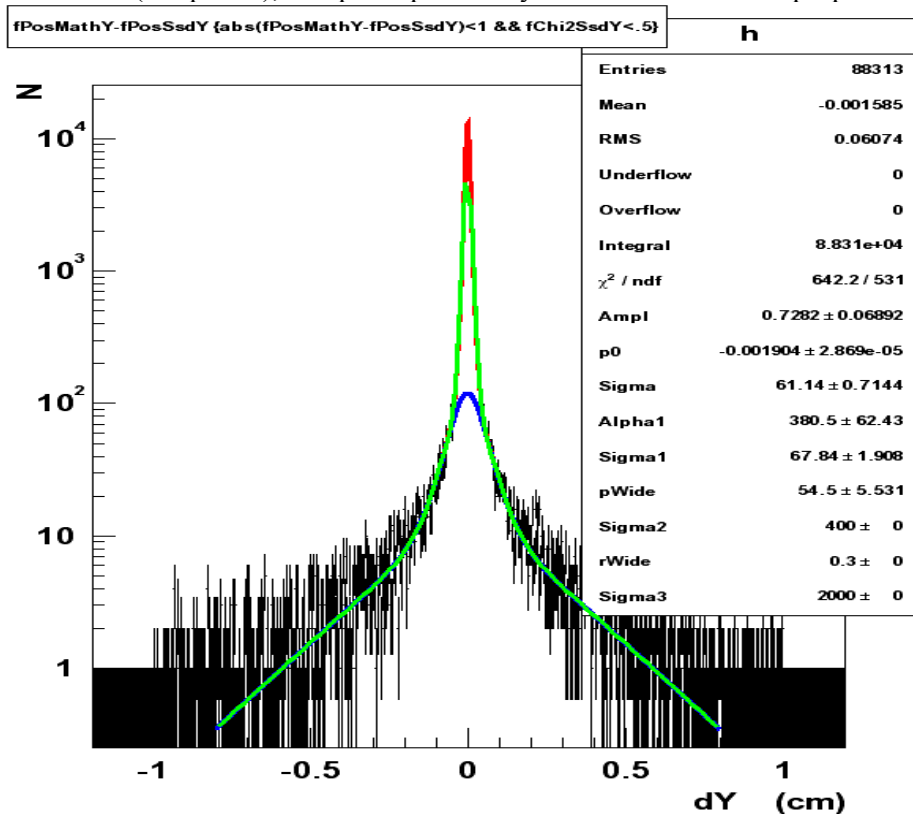


Рис. 6. Парметризация распределения остаточных отклонений, измеренного на PS. Можно различить узкую (70 микрон) и широкую (300 микрон) компоненту распределения.

### 2.3. Сборка, тестирование и ввод в эксплуатацию трековых камер

Для производства трековых камер в ПИЯФ был организован специальный сборочный участок (рис. 7). Он включает чистую комнату (оборудованную необходимыми устройствами для контроля климата) и несколько дополнительных комнат.

Окончательная сборка трековых станций, в которой сотрудники ПИЯФ принимали активное

участие, производилась в ЦЕРН (см. рис. 8). В процессе сборки камеры были протестированы на герметичность и высокое напряжение, оборудованы электроникой, электроника проверена, после чего был протестирован процесс чтения данных. К середине 2007 года сборка мюонного спектрометра была практически завершена, большая часть камер была установлена в детекторе ALICE. Время перед запуском было посвящено пусконаладочным работам: установке всех сервисов, тестам процесса чтения данных и пр.



**Рис. 7.** Вид чистой сборочной комнаты (а), процесс приклеивания печатных плат к композитным сэндвичам (б), машина для намотки проволоки (д), и процесс установки сигнальных проволок на каркас (с).



**Рис. 8.** Тесты трековых камер (слева) и собранная половина трековой станции (справа) в ЦЕРН.

### 3. Проектирование механики спектрометра

Группа ПИЯФ также внесла существенный вклад в проектирование механики различных частей мюонного спектрометра: мюонного фильтра и суперструктур [6]. Проектирование включает в себя полный набор чертежей и анализ конечных элементов (расчет напряжений и устойчивости, моделирование землетрясения). Первоначально проектирование было адаптировано к возможностям и особенностям российских заводов. К сожалению, цены, предложенные отечественной промышленностью, оказались слишком высоки, так что мюонный фильтр был перепроектирован для производства в мастерских ЦЕРН (рис. 9).

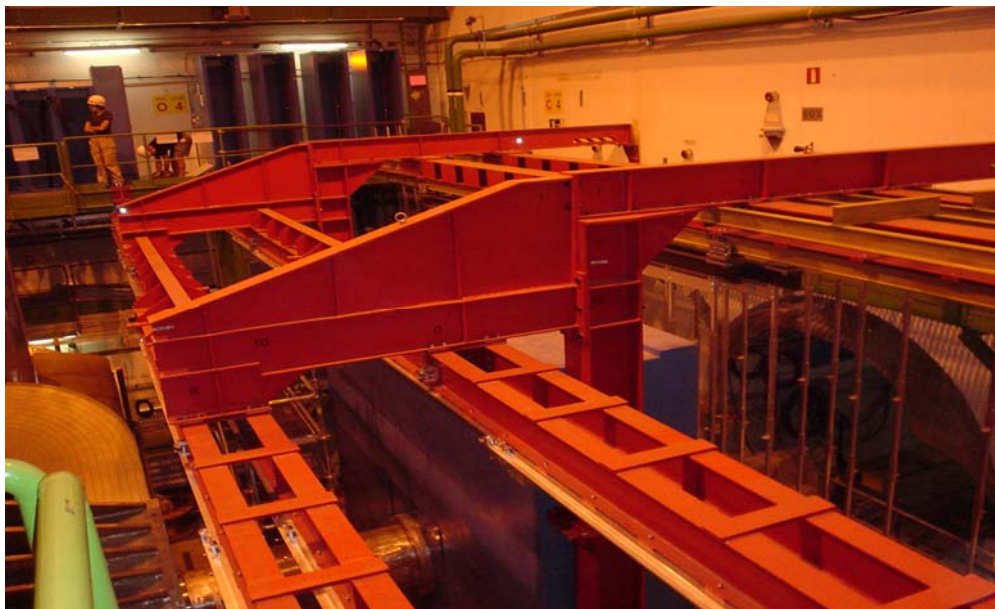


Рис. 9. Суперструктура для поддержки трековых и триггерных станций, разработанная группой ПИЯФ.

Члены группы ПИЯФ (рис. 10) также участвовали в измерениях карты магнитного поля, в геотрической съемке и креплении кабелей (совместно с группой сотрудников ОИЯИ, Дубна).



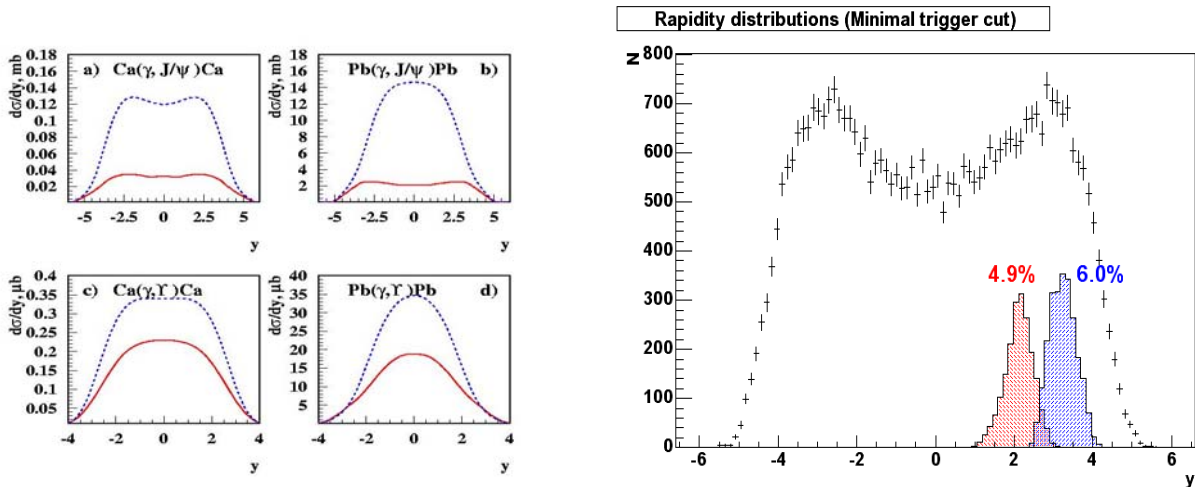
Рис. 10. Геометрическая съемка (слева) и процесс прокладки кабеля (справа) в эксперименте ALICE.



## 4. Подготовка программы физических исследований

### Фоторождение тяжелого кваркония

Проводимые в настоящее время эксперименты по исследованию экстремальных состояний ядерного вещества при столкновении тяжелых ионов на Коллайдере Релятивистских Ионов (RHIC) показали, что одним из ключевых параметров, определяющих свойства среды, формируемой в объеме взаимодействия сталкивающихся ионов, является плотность глюонов. В исследованиях глубоконеупругого электрон-протонного рассеяния, проведенных на ускорительном комплексе HERA, обнаружено, что плотность мягких глюонов на световом конусе быстро возрастает с уменьшением  $x = P_g/P_N$  (доли импульса протона, переносимой глюоном) до значений  $x \approx 10^{-4}$  при фиксированном квадрате переданного импульса  $Q^2$ , равно как и при увеличении  $Q^2$  при фиксированном  $x$ . В области  $10^{-4} < x < 10^{-3}$  и  $Q^2 \leq 5$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> неопределенности в величине плотности глюонов в протоне, извлеченной из данных, полученных в экспериментах H1 и ZEUS на ускорителе HERA, превышают фактор 2 из-за больших экспериментальных ошибок. При  $x < 10^{-4}$  данные о глюонных распределениях плотности в протоне вообще отсутствуют. Динамику ядро-ядерных столкновений при энергиях сталкивающихся ядер около 3 ТэВ на нуклон, которые будут реализованы на LHC, определяют глюоны с импульсами  $P_g = x \cdot P_N$  при  $10^{-5} < x < 10^{-4}$ . Однако ядерные глюонные плотности  $G_A(x)$  известны из экспериментальных измерений только при  $x$  больше  $10^{-3}$ , т.е. в области, где ядерные экранировки еще не столь существенны и  $G_A(x) \approx A \cdot g_p(x)$ . С уменьшением  $x$  и увеличением атомного номера ядер когерентные глюонные поля в ядрах должны усиливаться благодаря росту  $A \cdot g_p(x)$ , но одновременно становится значительным эффект ядерных экранировок, который замедляет этот рост. Учитывая отсутствие данных и ключевую роль ядерных глюонных полей в формировании кварк-глюонной плазмы в кинематике ядро-ядерных столкновений при энергиях LHC, получение независимой информации о ядерных глюонных плотностях при малых  $x$  является исключительно важным.



**Рис. 11.** Теоретические предсказания (слева) и результаты моделирования в AliRoot для когерентного фоторождения  $J/\psi$  (справа) как функция быстроты; синий пик соответствует случаю когда оба мюона детектируются в мюонном плече, красный пик соответствует случаю, когда один мюон регистрируется в мюонном плече, а второй в центральном барреле.

В работе [7], используя теоретический подход, основанный на факторизационных теоремах КХД для жестких процессов, показано, что можно исследовать поведение глюонных структурных функций в нуклонах и ядрах в области малых  $x$ , измеряя сечения фоторождения тяжелых кваркониев на протоне и ядре в ультрапериферических столкновениях. В результате проведенного моделирования [8] оказалось, что для изучения этих процессов необходимо лишь незначительное изменение триггера нулевого уровня в мюонном спектрометре (рис. 11). Были рассмотрены два случая: когда оба мюона зарегистрированы в мюонном спектрометре, и случай, когда один из мюонов попадает в мюонное плечо, а второй детектируется в барреле. В первом случае можно использовать стандартный

мюонный триггер с наложением вето в детекторах T0 и V0. Во втором случае дополнительный отбор возможен при наложении вето от фотонного спектрометра. Существует возможность использования более сложных триггеров нулевого уровня – от пиксельной части внутреннего трекера (множественность и поперечный импульс) и от времяпролетного детектора (топология). Дополнительная фильтрация событий возможна с применением триггера первого уровня от ZDC. Офлайн анализ  $p_t$  распределений кваркония позволяет произвести заключительную фильтрацию когерентных событий. Ожидаемые скорости счета составляют порядка 20000 событий с  $J/\Psi$  в обоих вариантах реконструкции и несколько сотен Упсилон-мезонов за один месяц набора статистики столкновений тяжелых ионов [8].

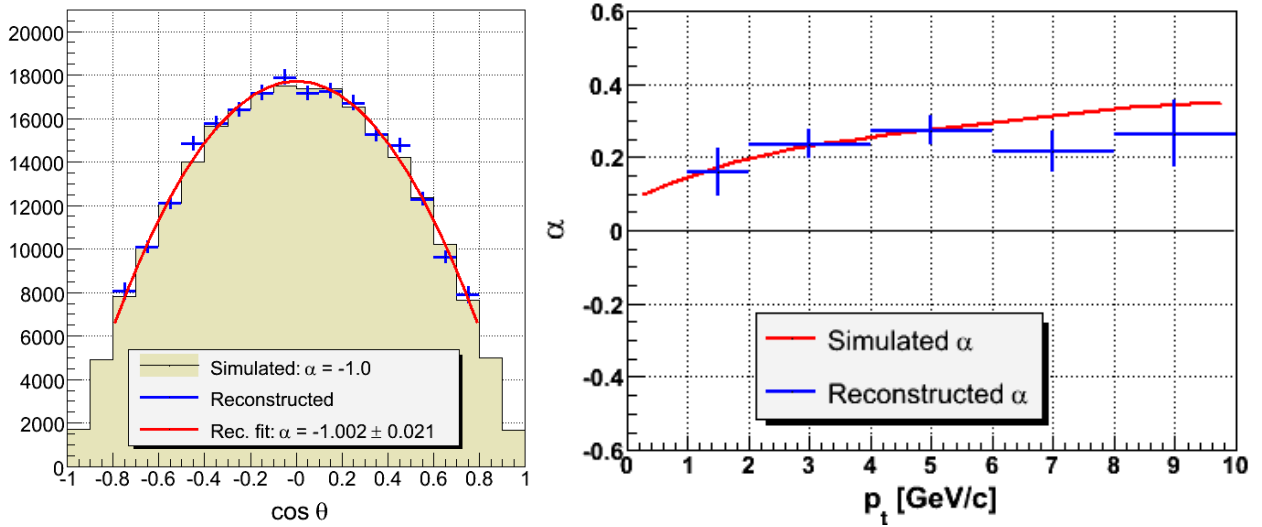
### **Изучение поляризации кваркония в протон-протонных, протон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях на детекторе ALICE**

Одним из возможных признаков образования и динамики состояния материи, которое формируется в столкновениях тяжелых ионов может быть поляризация кваркония, рожденного в центральном ядро-ядерном столкновении. Изучение поляризации кваркония в протон-протонных столкновениях является также важным инструментом для понимания механизма его образования и процесса адронизации.

В настоящее время предложено несколько теоретических моделей образования кваркония, которые предсказывают как разное сечение рождения чармония в протон-протонных взаимодействиях так и его различную поляризацию. Нет определенности и в экспериментальных данных. Измерения поляризации чармония в протон-антипротонных столкновениях в FNAL (США) показывают, что поляризация близка к нулю при малых поперечных импульсах ( $< 5$  ГэВ/с), а при больших становится растущей и продольной. Небольшая поперечная, но в среднем близкая к нулю, поляризация при небольших переданных импульсах была найдена при рождении чармония в протон-ядерных взаимодействиях в эксперименте E866. Измерения поляризации чармония на RHIC (Брукхэйвенская национальная лаборатория, США) имеют очень большую погрешность, хотя и указывают на то, что в дейтрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях чармоний рождается скорее неполяризованным.

С точки зрения будущих экспериментов на LHC по изучению кварк-глюонной плазмы знание и понимание механизма рождения и поляризации  $J/\Psi$  в ядро-ядерном взаимодействии представляется особенно интересным. В частности, подавление выхода  $J/\Psi$  из-за Дебаевской экранировки цветового заряда  $s$ -кварка в плотной кварк-глюонной среде считалось одним из наиболее ярких признаков формирования кварк-глюонной плазмы. Такое подавление действительно было обнаружено в ядро-ядерных экспериментах в ЦЕРН, однако более тщательный анализ показал, что аналогичный эффект может возникать из-за взаимодействия  $J/\Psi$  с адронами в конечном состоянии. Разумно предполагать, что измерение поляризации  $J/\Psi$ , рожденной в  $pp$ ,  $pA$  и  $AA$  столкновениях явилось бы дополнительным признаком, отражающим свойства среды, сформированной во взаимодействии. В настоящий момент имеется два предсказания для поляризации рожденного в плотной кварк-глюонной среде чармония с небольшими поперечными импульсами – поляризация либо отсутствует (эксперименты на RHIC), либо должна быть поперечной и довольно большой – 0,3-0,4 (Б.Иоффе, Д.Харзеев). С этой точки зрения ее измерение в эксперименте ALICE представляет несомненный интерес. Для выяснения возможности подобных измерений было проведено моделирование в среде AliRoot, разработан генератор событий, проведен трехмерный анализ аксептанса в переменных ( $p_\perp$ ,  $y$ ,  $\cos\theta$ ).

Показано [9], что регистрация  $J/\Psi$  в димюонном канале детектора ALICE в первом протон-протонном сеансе представляется реально осуществимой. При этом будет возможно измерение поляризации в трех кинематических областях по поперечному импульсу. Статистические погрешности на поляризационный параметр – порядка 0,02–0,05. Анализ возможности регистрации  $J/\Psi$  в диэлектронном канале проведен для случая Pb-Pb столкновений. Регистрация представляется возможной в пяти областях по поперечному импульсу со статистическими ошибками порядка 0,04–0,13 для центральных столкновений (см. рис. 12).



**Рис. 12.** Слева: распределения по  $\cos\theta$  в случае продольной поляризации  $J/\Psi$ , смоделированные и реконструированные в диэлектронном канале в диапазоне поперечных импульсов от 4 до 6 ГэВ. Справа: смоделированные и реконструированные распределения параметра поляризации в пяти бинах по поперечному импульсу.

## Литература

1. V. Nikulin, A. Vorobyov *et al.*, “Stations 4 and 5 of the ALICE muon spectrometer: modular approach”. ALICE internal note ALICE-INT/DIM-99-41.
2. V. Baublis, A. Khazadeev, V. Nikulin *et al.*, “Tooling for Dimuon arm tracking chambers: in-production ctests with beta-source”. ALICE internal note ALICE-INT/DIM-2003-044.
3. A. Khazadeev, V. Polyakov, E. Rostchin *et al.*, “High voltage test bed”. ALICE internal note ALICE-INT/DIM-2004-003.
4. V. Ivanov, V. Nikulin, E. Rostchin, V. Samsonov and E. Vznuzdaev, “Wire tension measurements for the ALICE muon arm slat chambers”. Preprint PNPI-2755, 2008.
5. A. Khazadeev, V. Nikulin, V. Samsonov *et al.*, “Dimuon arm tracking chambers in-beam tests: complementary analysis”. ALICE internal note ALICE-INT/DIM-2003-048.
6. V. Nikulin *et al.*, “Muon Filter geometrical parameters and tolerances”. ALICE internal note ALICE-INT/DIM-2002-021.
7. L. Frankfurt, M. Strikman and M. Zhalov, “Fading out of  $J/\psi$  color transparency in high energy heavy ion peripheral collisions”. Phys. Lett. B **450**, 220 (2002).
8. V. Nikulin and M. Zhalov, “Photoproduction of quarkonia in the kinematics of ALICE at LHC”. ALICE internal note ALICE-INT/DIM-2003-043.
9. E. Kryshen, “ $J/\psi$  polarization studies with the ALICE central barrel”, “ $J/\psi$  acceptance in barrel in first  $pp$  run”. PW G-3 Report, 18 April 2006.

# Исследование эффектов каналирования и объемного отражения изогнутых кристаллах

Ю.М. Иванов, Н.Ф. Бондарь, С.А. Вавилов, Ю.А. Гавриков, А.С. Денисов,  
А.В. Желамков, В.Г. Ивочкин, С.В. Косьяненко, Л.П. Лапина, А.А. Петрунин,  
В.В. Скоробогатов, В.М. Суворов, А.И. Щетковский

## 1. Введение

В последние годы было показано, что короткие изогнутые кремниевые кристаллы могут быть эффективно использованы для вывода частиц из ускорителей. Кристаллический вывод был применен как к основному пучку, так и к гало пучка. Идея кристаллической коллимации пучков Большого Адронного Коллайдера (LHC) в ЦЕРН состоит в использовании изогнутых кристаллов для отклонения протонов гало на специальный поглотитель. Таким образом протоны гало могут быть эффективно удалены из пучков LHC с помощью кристаллов, что позволит избежать потери сверхпроводимости в магнитах коллайдера при наивысших светимостях, а также уменьшит фон в коллайдерных детекторах. Ниже мы описываем недавние исследования свойств кремниевых кристаллов и их взаимодействия с пучками, выполненные в ПИЯФ, ИФВЭ и ЦЕРН с целью развития высокоэффективной системы кристаллической коллимации для пучков LHC.

## 2. Наблюдение эффекта упругой квазимозаичности в кремнии

Многочисленное кулоновское рассеяние заряженных частиц высоких энергий в веществе существенно влияет на эффективность кристаллов как дефлекторов пучка. Оценки показывают, что оптимальная длина кремниевых кристаллов весьма мала и лежит в миллиметровой или субмиллиметровой области, а угол изгиба атомных плоскостей составляет 100–200 мкрад. Мы нашли, что эти требования могут быть осуществлены путем использования эффекта упругой квазимозаичности в изогнутых кремниевых пластинах.

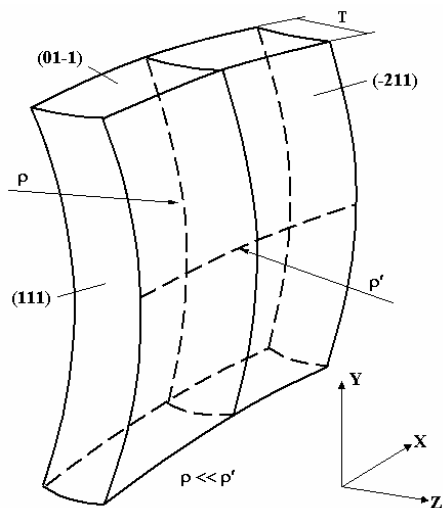


Рис. 1. Упругоквазимозаичный эффект в изогнутой кремниевой пластине: изгиб пластины по цилиндру с радиусом  $\rho$  приводит к искривлению  $(111)$  кристаллографических плоскостей вдоль толщины  $T$  пластины. Радиус  $\rho'$  характеризует кривизну, вызванную поперечным сжатием (растяжением) от продольного растяжения (сжатия) элементов объема пластины при изгибе (антикластический эффект)/

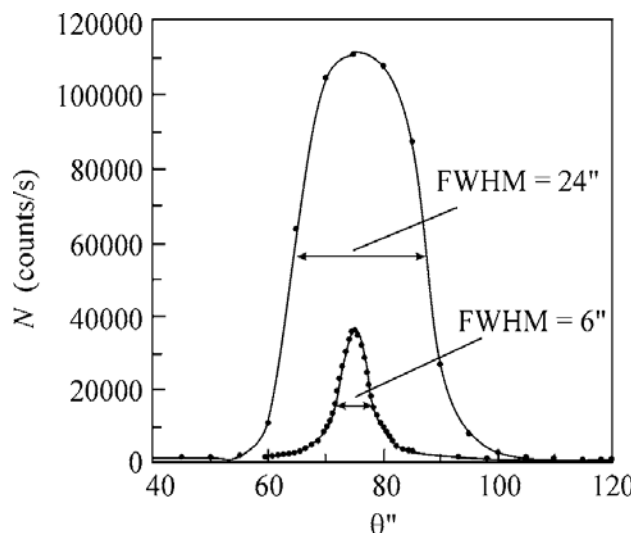


Рис. 2. Кривые качания до и после изгиба пробной пластины (полные ширины на полувысоте равны 6" и 24", соответственно)/

Эффект упругой квазимозаичности широко известен в кристалл-дифракционной гамма- и рентгеновской спектрометрии в результате исследований, выполненных О.И. Сумбаевым в 60-е гг. Им было показано, что при изгибе монокристаллической кварцевой пластины (используемой для дифракции излучения) происходит изгиб атомных плоскостей, первоначально совпадающих с нормальными сечениями пластины, что уширяет дифракционные профили  $\gamma$ -линий, как если бы изогнутая пластина в результате изгиба приобрела мозаичность, причем, величина мозаичности полностью определяется ориентацией пластины относительно кристаллографических плоскостей. Похожее поведение при изгибе было предсказано и для других материалов, в том числе для кремния.

Используя рентгеновское излучение, мы исследовали свойства кремниевых пластин, вырезанных под различными углами относительно кристаллографических осей и нашли, что эффект упругой квазимозаичности имеет место для (111) плоскостей кремния [1]. Ориентация пластины, соответствующая наибольшей величине эффекта, показана на рис. 1.

Величина эффекта определялась путем измерения на двухкристальном спектрометре кривых качания в моде на прохождение  $K_{\alpha 1}\text{Mo}$  излучения через пробную пластину до и после изгиба. Пробная пластина имела размеры  $20(X) \times 60(Y) \times 0,43(Z)$  мм<sup>3</sup>. Результаты измерений показаны на рис. 2. Полная ширина на полувысоте кривой качания для неизогнутой пластины равна 6" и близка к ширине кривой качания для идеальных кристаллов. При изгибе пластины по радиусу  $\rho = 92$  см в YZ--плоскости ширина и амплитуда кривой качания возрастали в 4 раза, что свидетельствовало о квазимозаичном изгибе (111) плоскостей. Ширина кривой качания для изогнутой пластины была найдена равной 24", или 120 мкрад, и характеризовала величину изгиба плоскостей (111) на длине 0,43 мм. Большие грани пластины имели седлообразную форму с радиусом изгиба  $\rho' = 410$  см в горизонтальной XZ-плоскости, определенным по вариации угла дифракции излучения различными частями кристалла.

Контрольный опыт был выполнен с пластиной, приготовленной из того же слитка, идентичной описанной выше за исключением поворота угла выреза пластины на 30° вокруг нормали к (111) плоскости. При изгибе контрольной пластины кривая качания практически не изменилась.

Измеренные углы квазимозаичного изгиба атомных плоскостей кремния находятся в согласии с расчетными и близки значениям, подходящим для решения проблем кристаллической коллимации.

### 3. Наблюдение эффекта объемного отражения протонов с энергией 1 ГэВ в изогнутом кристалле кремния

Используя эффект упругой квазимозаичности, мы приготовили серию кремниевых кристаллов, изогнутых на субмиллиметровой длине, и исследовали их в ИФВЭ на пучке протонов с энергией 70 ГэВ. В проведенных опытах, помимо хорошо известного процесса каналирования протонов, мы обнаружили объемное отражение протонов в изогнутом кристалле [2, 3] – новый эффект, предсказанный А.М. Таратыным и С.И. Воробьевым в 80-е гг. Этот эффект, обусловленный когерентным взаимодействием заряженной частицы с изогнутой атомной решеткой вблизи точки касания траектории и изогнутой атомной плоскости, приводит к угловому отклонению частицы на угол масштаба угла Линдхарда в сторону, противоположную изгибу.

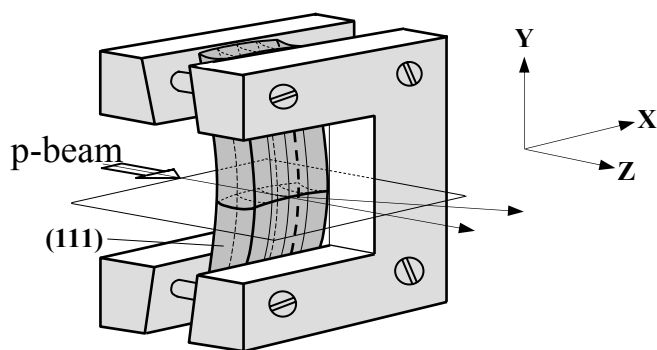


Рис. 3. Способ изгиба (111) плоскостей кремния (совпадающих с узкой вертикальной гранью кристаллической пластины)/

Использованная в данных опытах пластина кремния, имела размеры  $20(X) \times 60(Y) \times 0,72(Z)$  мм<sup>3</sup>, ориентация показана на рис. 1. Пластина была изогнута в YZ-плоскости методом приложенных моментов (рис. 3) по радиусу 48 см, что приводило к квазимозаичному изгибу (111) плоскостей в XZ-плоскости по радиусу 1,7 м с полным углом изгиба ~420 мкрад. Радиус «седла» в XZ-плоскости был найден равным 3,2 м в центре кристалла и увеличивающимся к областям зажима.

Кристалл был установлен на поворотном столике таким образом, что область его пересечения с протонным пучком составляла в X-направлении 4 мм (рис. 4). Начальная установка по углу выполнялась путем совмещения отражений света лазера от граней кристалла с метками, привязанными к положению оси протонного пучка. Угловое положение, при котором протоны каналировали в кристалле, определялось по наибольшей скорости счета совпадений между узкими сцинтилляционными счетчиками S1 и S2, помещенными в пучке и вне пучка, соответственно. Большой сцинтилляционный счетчик S3 использовался для мониторингирования пучка.

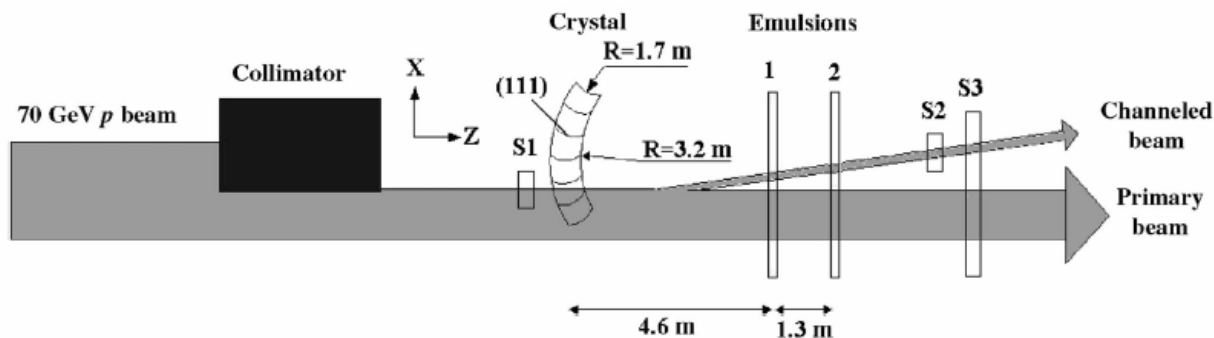


Рис. 4. Схема эксперимента. S1, S2, S3 – сцинтилляционные счетчики./

Протонный пучок имел интенсивность  $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$ , позволявшую работать в счетном режиме. Угловая расходимость пучка составляла  $\sim 15$  мкрад, расходимость, вносимая многократным кулоновским рассеянием в кристалле на длине 0,72 мм, равнялась 13,5 мкрад. Как расходимость первичного пучка, так и рассеяние в кристалле были существенно меньше критического угла каналирования, равного 24 мкрад в нашем случае.

Профиль пучка, прошедшего через кристалл в положении каналирования, измерялся при помощи фотоэмульсий типа P-100, помещенных на расстоянии 4,6 м и 5,9 м от кристалла. Эмульсии были облучены с плотностью  $\sim 5$  протонов/(мм<sup>2</sup>) и показали три четких немного искривленных линии А, В и С. Эти линии были хорошо видны на фоне широкого пятна от первичного пучка, имевшего форму полукруга из-за обрезания части пучка коллиматором. Профили пучка на эмульсиях были похожи, но разделение линий было наибольшим в наиболее удаленной эмульсии, которая показана на рис. 5. С помощью микроскопа мы измерили положения и ширины наблюдаемых на эмульсиях линий относительно X-оси для центральной части кристалла и провели их анализ.

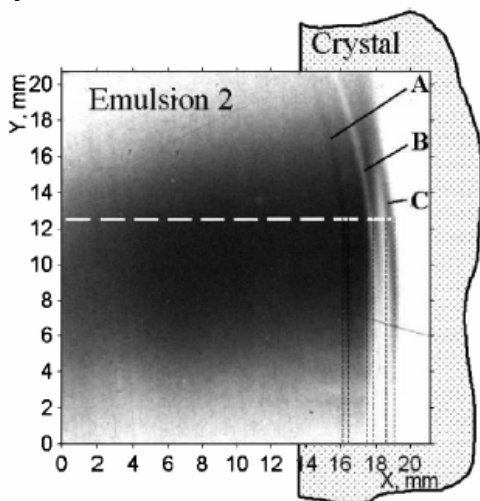


Рис. 5. Часть эмульсии 2 с профилем протонного пучка. Белая штрихованная линия показывает линию измерения с микроскопом. Черные штрихованные линии показывают X-отсчеты, соответствующие границам линий А, В и С.

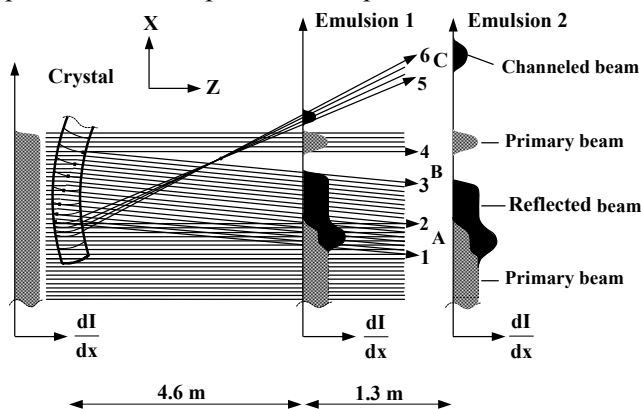


Рис. 6. Протонные траектории, пересекающие кристалл и эмульсии в горизонтальной плоскости (вид сверху). Падающий пучок показан параллельным (расстояние между эффективным «источником» пучка и кристаллом много больше «седлового» радиуса кристалла) с однородным распределением интенсивности вдоль X-направления. Жирные точки внутри кристалла указывают точки касания протонных траекторий и (111) атомных плоскостей, где имеет место объемное отражение./

На основе выполненного анализа было найдено простое объяснение измеренных профилей пучка, приведенное на рис. 6, где показаны траектории протонов в горизонтальной XZ-плоскости. В этой плоскости кристалл имеет кривизну, поэтому атомные (111) плоскости изменяют ориентацию вдоль X-направления. В малом X-интервале, где протоны влетают в кристалл касательно (111) плоскостям на входной грани, часть частиц захватывается в режим каналирования (лучи между 5 и 6 на рис. 6), образуя темное пятно С. Для протонов, влетающих при больших X-координатах, выполняются условия объемного отражения, поскольку их траектории касательны (111) плоскостям где-то в объеме кристалла (лучи между 1 и 3 на рис. 6). Вне X-интервалов, соответствующих каналированию и объемному отражению, налетающие протоны проходят через кристалл, испытывая многократное кулоновское рассеяние (лучи выше 4 и ниже 2 на рис. 6), величина которого мала. В результате возникает свободная от протонов область между первичным и отраженным пучком, отмеченная как В, и другая область, где первичный и отраженный пучки смешиваются, отмеченная как А.

Выше и ниже горизонтальной плоскости, проходящей через середину кристалла, мы имеем такую же картину взаимодействия протонов с кристаллом за исключением того, что изменение «седлового» радиуса по высоте приводит к плавному смещению темных и светлых пятен. В результате сводная картина образует три линии (две темных линии А и С и одну светлую линию В) одинаковой слегка изогнутой формы.

Угол отклонения каналированных протонов определяется отношением расстояния между линиями А и С к расстоянию между кристаллом и соответствующей эмульсией. Усредняя по двум эмульсиям, мы нашли значение  $435 \pm 6$  мкрад, которое согласуется с углом изгиба (111) плоскостей, измеренным с рентгеновским излучением.

Угол отклонения  $2\theta_R$  отраженных протонов оценивается по угловой ширине линий А и В, равной отношению линейной ширины к расстоянию между кристаллом и соответствующей эмульсией. Усредняя угловые ширины А и В, мы нашли  $2\theta_R$  равным  $39,5 \pm 2,0$  мкрад, или  $(1,65 \pm 0,08) \cdot \theta_c$  в терминах критического угла каналирования.

Темный цвет линии А свидетельствует о том, что вероятность отражения существенно превосходит вероятность каналирования. Ширина отраженного пучка существенно превосходит ширину каналированного – это является следствием того, что угловой акцептанс объемного отражения определяется углом изгиба атомных плоскостей, а угловой акцептанс каналирования ограничен величиной критического угла  $\theta_c$ .

#### 4. Исследование объемного отражения протонов с энергией 1 ГэВ в ПИЯФ

Полученная в эмульсионном эксперименте в ИФВЭ оценка вероятности объемного отражения носила качественный характер. В следующем эксперименте с применением электронных детекторов эффекты каналирования и объемного отражения были зарегистрированы отдельно, что дало более детальные данные о процессе объемного отражения [4, 5].

Работа была выполнена на 1 ГэВ протонном синхротроне ПИЯФ. Экспериментальный метод (рис.7) включал формирование узкого малорасходящегося протонного пучка на кристалле и

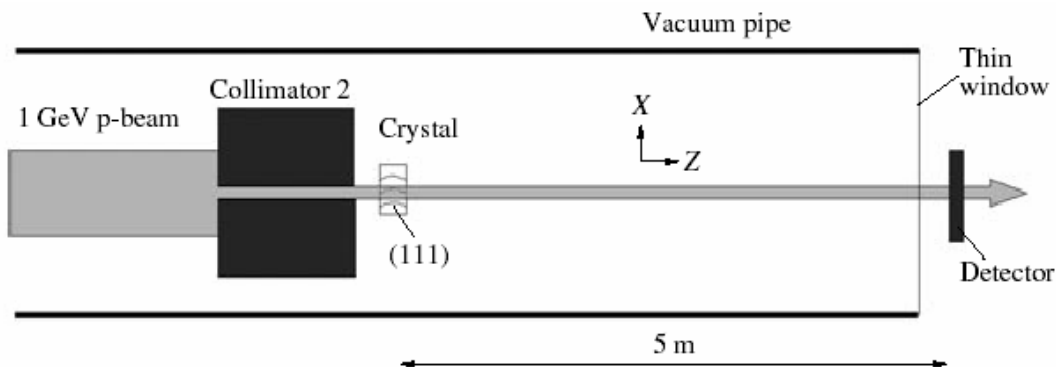


Рис. 7. Схема эксперимента по наблюдению объемного отражения протонов с энергией 1 ГэВ.

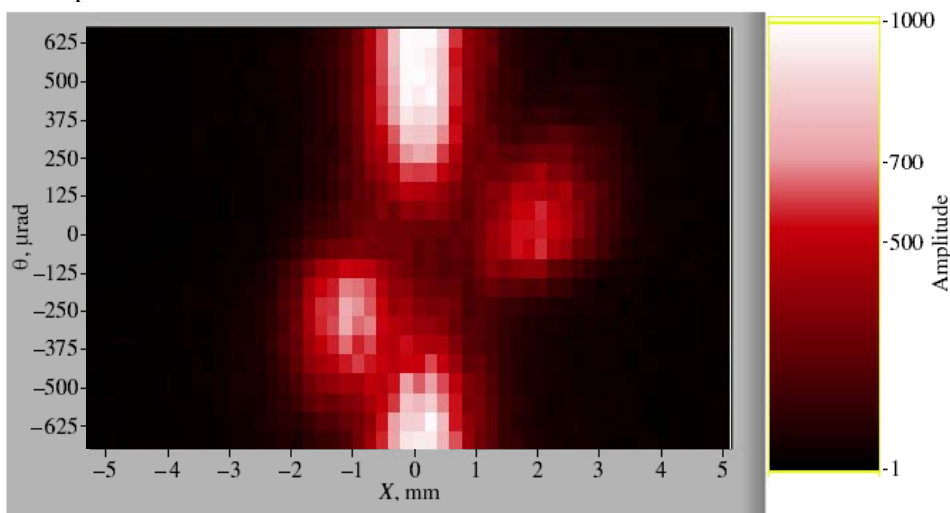
измерение распределения протонов, отклоненных кристаллом, с помощью быстрых детекторов с высоким позиционным разрешением.

Формирование пучка было выполнено посредством двух коллиматоров, имевших в длину около 1 м и отстоявших друг от друга на 31 м, и отклоняющего магнита между ними. Настроенный пучок имел на выходе второго коллиматора полуширину в горизонтальной плоскости  $80 \pm 20$  мкм, угловую расходимость  $160 \pm 20$  мкрад и интенсивность около  $2 \times 10^4$  протонов в секунду.

В качестве рабочего кристалла была использована кремниевая пластинка, вырезанная согласно рис. 1. Толщина пластинки составляла 30 мкм и приводила к среднему углу многократного рассеяния 105 мкрад (что меньше критического угла каналирования 170 мкрад для Si (111) плоскостей и 1 ГэВ протонов). Пластинка была изогнута по радиусу 22 мм в вертикальной плоскости при помощи цилиндрических зеркал с 3 мм отверстием в центре для прохождения протонного пучка. Квазимозаичный изгиб (111) плоскостей, измеренный с помощью рентгеновского излучения, составлял  $380 \pm 20$  мкрад. Изогнутый кристалл был установлен на поворотный столик, укрепленный на выходном торце второго коллиматора таким образом, чтобы ось протонного пучка совпадала с центром кристалла. Позиционно-чувствительные детекторы были помещены на расстоянии 5 м от кристалла. Вакуумный тракт заканчивался непосредственно перед ними.

Одним из детекторов служила плоскопараллельная позиционно-чувствительная газовая камера (анодная плоскость камеры была разделена на 64 полосы с шагом 200 мкм), другим – скрещенная пара сцинтилляционных счетчиков (шириной 80 мкм каждый), снабженная линейным перемещением и включенная на совпадения. Оба детектора имели ограниченную по высоте область регистрации протонов и позволяли измерять профиль пучка в горизонтальной плоскости.

Типичный угловой скан с плоскопараллельной камерой показан на рис. 8. По оси абсцисс отложена координата анодной полосы в мм, нулевое значение соответствует оси первичного пучка. По оси ординат отложен угол кристалла в мкрад, нулевое значение соответствует касанию оси первичного пучка и (111) плоскостей на входной грани кристалла. Цвет точки соответствует числу протонов, цветовая шкала показана справа. На графике ясно видны два эффекта, противоположно отклоняющиеся частицы относительно начального направления движения. Правое и левое пятна легко определяются как области проявления эффектов каналирования и объемного отражения, соответственно. Нижнее и верхнее пятна отвечают первичному пучку, прошедшему через неориентированный кристалл.



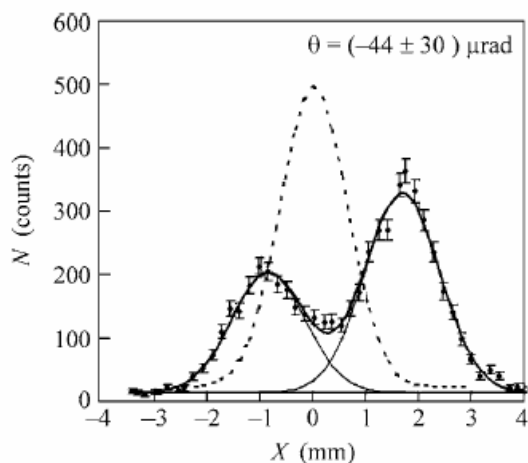
**Рис. 8.** Профиль пучка в зависимости от углового положения кристалла, измеренный с помощью плоскопараллельной позиционно-чувствительной камеры.

Профили пучка в угловых положениях кристалла, отвечающих максимальному каналированию и объемному отражению, измеренные сцинтилляционным детектором, показаны на рис. 9 и 10. Штрихованная линия на графиках представляет профиль пучка при неориентированном кристалле.

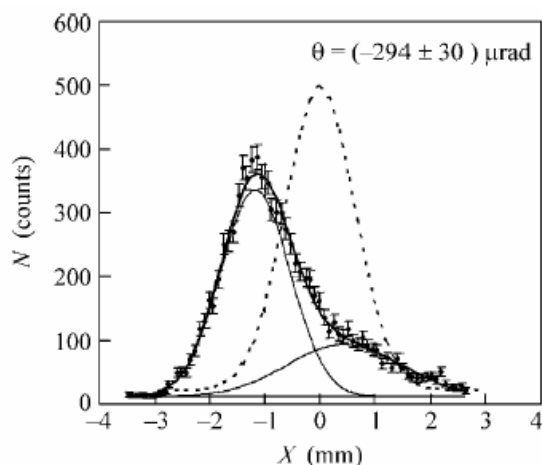


Согласно результатам фитирования пиков вероятность объемного отражения равна  $0,71 \pm 0,03$ . Она превосходит вероятность каналирования, равную  $0,63 \pm 0,03$ . Угол отклонения протонов, отраженных внутри кристалла, найден равным  $1,39 \pm 0,04$  в единицах критического угла, полуширина отраженного пика равна  $1,76 \pm 0,04$  в тех же единицах.

Из графика на рис. 9 следует, что протоны, не захваченные в режим каналирования, испытывают объемное отражение и отклоняются на угол  $1,01 \pm 0,05$  в единицах критического угла каналирования, полуширина отраженного пика равна  $1,94 \pm 0,08$  в тех же единицах.



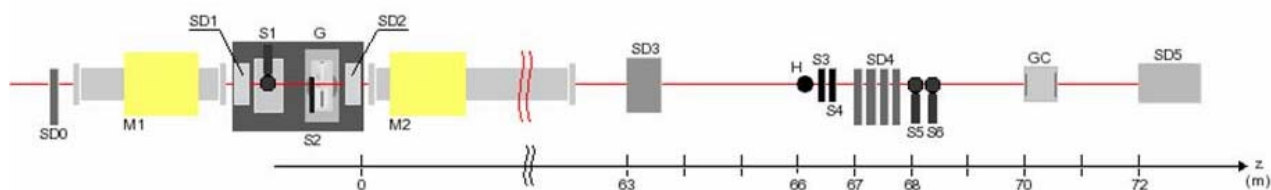
**Рис. 9.** Профиль пучка в угловом положении кристалла, отвечающем максимальному каналированию, измеренный с помощью сцинтилляционного детектора. Время накопления в точке равно 10 секундам.



**Рис.10.** Профиль пучка в угловом положении кристалла, отвечающем максимальному объемному отражению, измеренный с помощью сцинтилляционного детектора. Время накопления в точке равно 10 секундам.

## 5. Исследование объемного отражения протонов с энергией 400 ГэВ в CERN

Новым этапом в исследовании эффекта объемного отражения стал эксперимент [6], выполненный на пучке протонов с энергией 400 ГэВ канала Н8 ускорителя SPS в ЦЕРН. Пучок имел расходимость  $8 \pm 1$  мкрад, поперечный размер  $\sim 1$  мм и интенсивность  $10^4$ – $10^5$  протонов в секунду. Схема эксперимента показана на рис. 11. Установка состояла из высокопрецизионного гониометра (G), на котором помещались исследуемые кристаллы, и различных детекторов для счета и определения треков частиц. Детекторы располагались в окрестности кристалла и на протяжении 70 м от него.

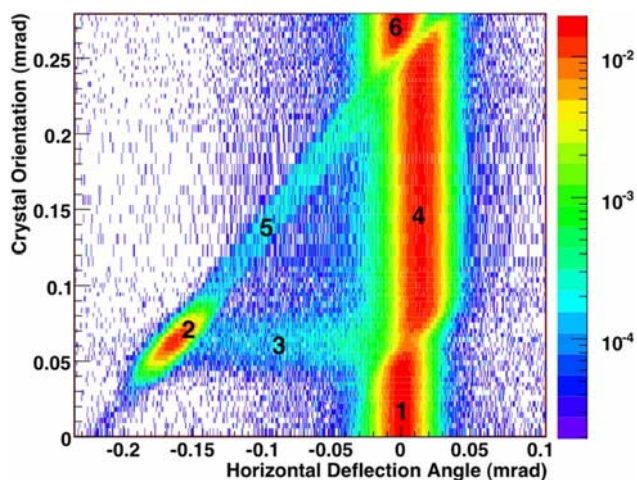


**Рис. 11.** Схема экспериментальной установки Н8-RD22. M1 и M2 - магниты канала транспортировки частиц Н8, не имевшие специального значения для эксперимента. Остальные элементы установки описаны в тексте.

Для проведения эксперимента было приготовлено несколько квазимозаичных и полосковых кремниевых кристаллов. В случае полосковых кристаллов каналирующие (110) плоскости были изогнуты за счет антикластического эффекта (приводящего к седлообразной форме изогнутой пластины, см. рис. 1) на длине в несколько мм. Угол многократного рассеяния в кристаллах был менее 5 мкрад и не превосходил критический угол каналирования  $\sim 10$  мкрад.

Гониометр имел три точных перемещения: два линейных и одно угловое. Линейные перемещения использовались для выставления кристалла на центр пучка с точностью несколько мкм, угловое движение использовалось для сканирования по углу и имело точность  $\sim 1,5$  мкрад.

Шесть сцинтилляционных счетчиков использовались для определения поперечного смещения пучка относительно кристалла (S1–S2), обеспечения триггерного сигнала для кремниевых детекторов (S3–S4) и измерения расходимости и профиля протонного пучка (S5–S6). Сцинтилляционный



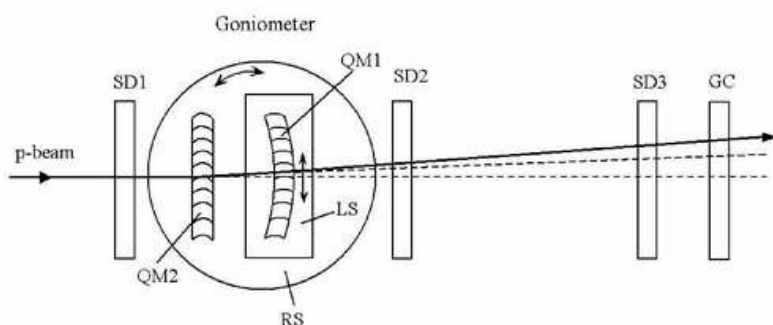
**Рис. 12.** Распределение интенсивности пучка по горизонтальному углу отклонения (X-ось) при различных угловых положениях кристалла (Y-ось). Отмеченные области: (1) и (6) неориентированный кристалл; (2) каналирование; (3) деканалирование; (4) объемное отражение; (5) объемный захват. Более широкий угловой акцептанс объемного отражения по сравнению с каналированием ясно виден из графика.

годоскоп (H) и позиционно-чувствительная газовая камера (GC) работали в режиме самозапуска и использовались для быстрого ориентирования кристалла. Измерения с большой статистикой в области каналирования и объемного отражения выполнялись с кремниевыми микростриповыми детекторами (SD*n*), имевшими пространственное разрешение 10–30 мкм.

На рис. 12 показан результат типичного углового скана кристаллом. Для приведенного графика угол отклонения каналированного пучка равен  $165 \pm 2$  мкрад (согласуется с величиной изгиба кристалла), эффективность каналирования  $\sim 55\%$ , угол отклонения объемно отраженного пучка  $13,9 \pm 0,2_{\text{stat}} \pm 1,5_{\text{sys}}$  мкрад (согласуется с теоретическими оценками), эффективность объемного отражения – более 95% и значительно превышает максимальную теоретически достижимую эффективность каналирования.

## 6. Наблюдение двойного объемного отражения протонного пучка последовательно двумя изогнутыми кристаллами

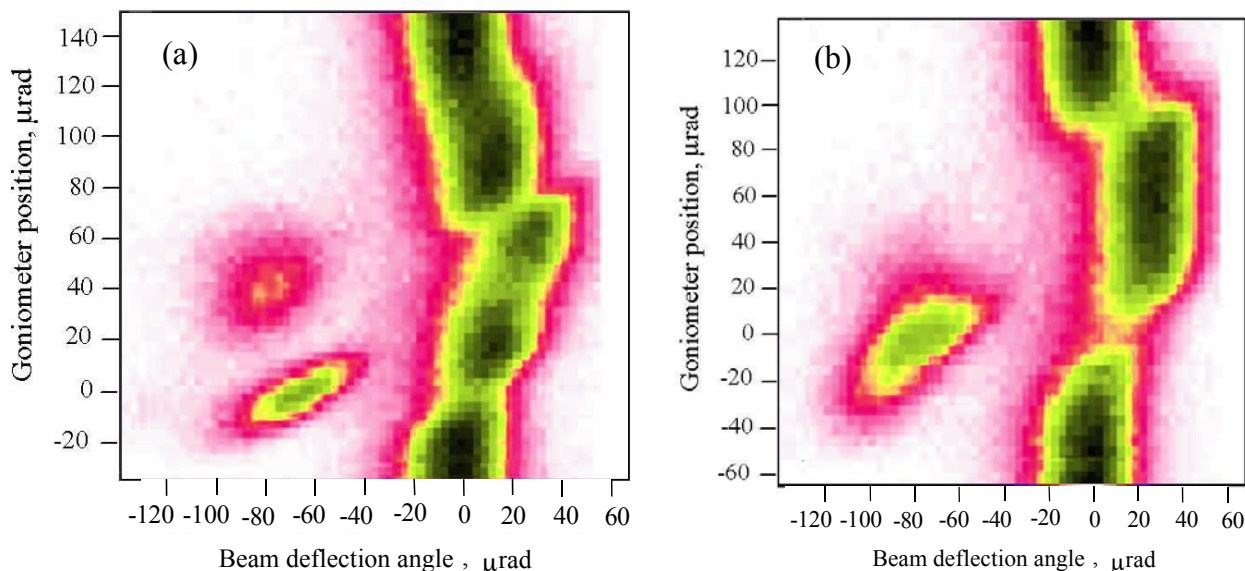
Используя пучок и установку, описанные в предыдущей секции, мы выполнили эксперимент по двойному объемному отражению в двух квазимозаичных кристаллах [7]. Схема измерения показана на рис. 13.



**Рис. 13.** Схема измерения в горизонтальной плоскости (вид сверху). QM1 и QM2 – два квазимозаичных кристалла, установленных на поворотный столик RS гониометра. Кристалл QM1 был дополнительно снабжен линейным перемещением LS, которое позволяло выстроить QM1 относительно QM2. SD1, SD2, SD3 – кремниевые микростриповые детекторы, GC – позиционно-чувствительная газовая камера. Линии представляют траектории протонов: нижняя штрихованная соответствует неориентированному кристаллу, верхняя штрихованная – отражению первым кристаллом, сплошная – отражению двумя кристаллами.

Две кремниевые пластинки QM1 и QM2 с атомными (111) плоскостями, изогнутыми на угол  $\sim 70$  мкрад вдоль толщины  $\sim 0,8$  мм, были установлены на гониометр. (111) плоскости пластины QM1 имели веерообразное расположение, что позволяло выстроить их относительно пластины QM2 в области пересечения с пучком, используя поперечное линейное перемещение держателя QM1.

На рис. 14 показаны угловые сканы, выполненные до (а) и после (б) точной выстройки кристаллов. Пики каналирования QM2 и QM1 кристаллов видны как два изолированных пятна при отрицательных значениях угла отклонения пучка на рис. 14а. Этот скан был сделан до выстройки, поэтому два пика находятся при разных угловых положениях гониометра.

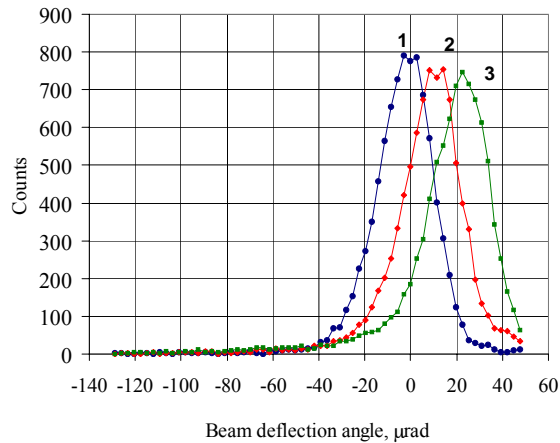


**Рис. 14.** Угловые сканы, выполненные до (а) и после (б) точной выстройки кристаллов. По Y-оси показано угловое положение гониометра, по X-оси угол отклонения пучка, измеренный GC детектором. Начало X-оси соответствует направлению падающего пучка. Начало Y-оси соответствует угловому положению максимума эффекта каналирования в кристалле QM2. В (а) оба пика каналирования от QM1 и QM2 видны. В (б) пики каналирования совпадают и сопровождаются двойным объемным отражением. Цвет передает интенсивность пучка в данном направлении и при данном угловом положении кристалла.

Углы отклонения каналированных протонов, измеренные детекторами SD2 и SD3, были найдены равными  $68,6 \pm 0,9$  и  $78,1 \pm 4,8$  мкрад для QM2 и QM1, соответственно. Углы отклонения и эффективности однократного объемного отражения составили  $11,70 \pm 0,51$  мкрад и  $(98,27 \pm 0,50)\%$  для QM2 и  $11,90 \pm 0,59$  мкрад и  $(97,80 \pm 0,64)\%$  для QM1. Области объемного отражения, соответствующие QM2 и QM1 кристаллам на рис.14а, частично наложены, что приводит к отклонению протонного пучка на больший угол по сравнению с однократным отражением.

Точное определение угла и эффективности двойного отражения было выполнено в выстроенном положении кристаллов QM2 и QM1, соответствующем рис.14б. Угол отклонения дважды отраженного пучка был найден равным  $23,23 \pm 0,18_{\text{stat}} \pm 0,09_{\text{sys}}$  мкрад, что в 2 раза превосходит угол однократного отражения. Эффективность двойного отражения составила  $(96,73 \pm 0,38_{\text{stat}} \pm 0,50_{\text{sys}})\%$ . На рис. 15 показаны профили пучка для трех случаев, отвечающих рассеянию, однократному и двойному отражению в кристаллах.

Таким образом, эксперимент продемонстрировал осуществимость многократного объемного отражения последовательностью коротких изогнутых кристаллов с высокой эффективностью и углом отклонения, пропорциональным числу отражений. Этот результат открывает новые пути развития кристаллической оптики для управления пучками заряженных частиц высоких энергий.



**Рис. 15.** Профили пучка, соответствующие двум неориентированным кристаллам (1), объемному отражению в одном кристалле (2), двойному объемному отражению в двух кристаллах (3).

## 7. Заключение

Проведенные исследования показали, что объемное отражение имеет высокую эффективность и большой угловой акцептанс по сравнению с каналированием, что открывает новые возможности применения кристалл-оптики на ускорителях и в физике высоких энергий.

## Литература

1. Ю.М. Иванов, А.А. Петрунин и В.В. Скоробогатов, “Наблюдение эффектов упругой квазимозаичности в изогнутом кристалле кремния”. Письма в ЖЭТФ **81**, 129 (2005) [JETP Lett. **81**, 99 (2005)].
2. Ю.М. Иванов, А.А. Петрунин, В.В. Скоробогатов *и др.*, “Наблюдение отражения протонного пучка от изогнутых атомных плоскостей”. Препринт ПИЯФ-2649, Гатчина, 2005, 22 с.
3. Yu.M. Ivanov, A.A. Petrunin, V.V. Skorobogatov *et al.*, “Volume reflection of a proton beam in a bent crystal”. Phys. Rev. Lett. **97**, 144801 (2006).
4. Ю.М. Иванов, Н.Ф. Бондарь, Ю.А. Гавриков *и др.*, “Объемное отражение 1 ГэВ протонов изогнутым кристаллом кремния”. Препринт ПИЯФ-2687, Гатчина, 2006, 16 с.
5. Ю.М. Иванов, Н.Ф. Бондарь, Ю.А. Гавриков *и др.*, “Объемное отражение протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом кремния”. Письма в ЖЭТФ **84**, 445 (2006) [JETP Lett. **84**, 372 (2006)].
6. W. Scandale, D.A. Still, A. Carnera *et al.*, “High-efficiency volume reflection of an ultrarelativistic proton beam with a bent silicon crystal”. Phys. Rev. Lett. **98**, 154801 (2007).
7. W. Scandale, A. Carnera, G. Della Mea *et al.*, “Double volume reflection of a proton beam by a sequence of two bent crystals”. Phys. Lett. B **658**, 109 (2008); Phys. Lett. B **660**, 610 (2008);

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Эксперименты на большом адронном коллайдере LHC – новая эра в физике высоких энергий.....	4
Эксперимент CMS	
А.А. Воробьев, Д.М. Селиверстов, Ю.М. Иванов, Н.Ф. Бондарь, С.А. Вавилов, Г.Н. Величко, С.С. Волков, Ан.А. Воробьев, В.Л. Головцов, А.Г. Голяш, Ю.И. Гусев, А.С. Денисов, Г.Ф. Жмакин, В.С. Козлов, В.И. Лазарев, В.Д. Лебедев, П.М. Левченко, Г.В. Макаренков, Е.М. Оришин, А.А. Петрунин, <u>В.А. Скнар</u> , В.В. Сулимов, В.В. Тарасенков, <u>И.И. Ткач</u> , Л.Н. Уваров, А.И. Щетковский, Л.А. Щипунов В.И. Яцура.....	6
Эксперимент ATLAS	
О.Л. Федин, Е.Г. Данилевич, А.Ю. Залите, С.Н. Коваленко, Л.Г. Кудин, В.П. Малеев, А.В. Надточий, С.К. Патричев, Ю.Ф. Рябов, Е.В. Седых, Д.М. Селиверстов, Э.М. Спириденков, А.Е. Христачев, В.А. Щегельский.....	16
Эксперимент LHCb	
А.А. Воробьев, Б.В. Бочин, Н.Ф. Бондарь, С.С. Волков, Ан.А. Воробьев, В.Л. Головцов, <u>Г.А. Городницкий</u> , С.А. Гец, А.А. Жданов, А.П. Кашук, В.С. Козлов, З.Г. Кудряшова, В.И. Лазарев, В.Д. Лебедев, О.Е. Маев, Г.В. Макаренков, П.В. Неустроев, Н.Р. Сагидова, Э.М. Спириденков, Н.П. Степанова, В.И. Тараканов, О.Е. Федоров, А.Ю. Царегородцев.....	24
Эксперимент ALICE	
В.М. Самсонов, В.А. Евсеев, М.Б. Жалов, В.В. Иванов, Е.Л. Крышень, Н.М. Мифтахов, В.Н. Никулин, В.В. Поляков, Е.В. Рощин, <u>В.И. Рязанов</u> , О.П. Тарасенкова, А.В. Ханзадеев.....	34
Исследование эффектов каналирования и объемного отражения в изогнутых кристаллах	
Ю.М. Иванов, Н.Ф. Бондарь, С.А. Вавилов, Ю.А. Гавриков, А.С. Денисов, А.В. Желамков, В.Г. Ивочкин, С.В. Косьяненко, Л.П. Лапина, А.А. Петрунин, В.В. Скоробогатов, В.М. Суворов, А.И. Щетковский.....	45
Содержание.....	54