

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.

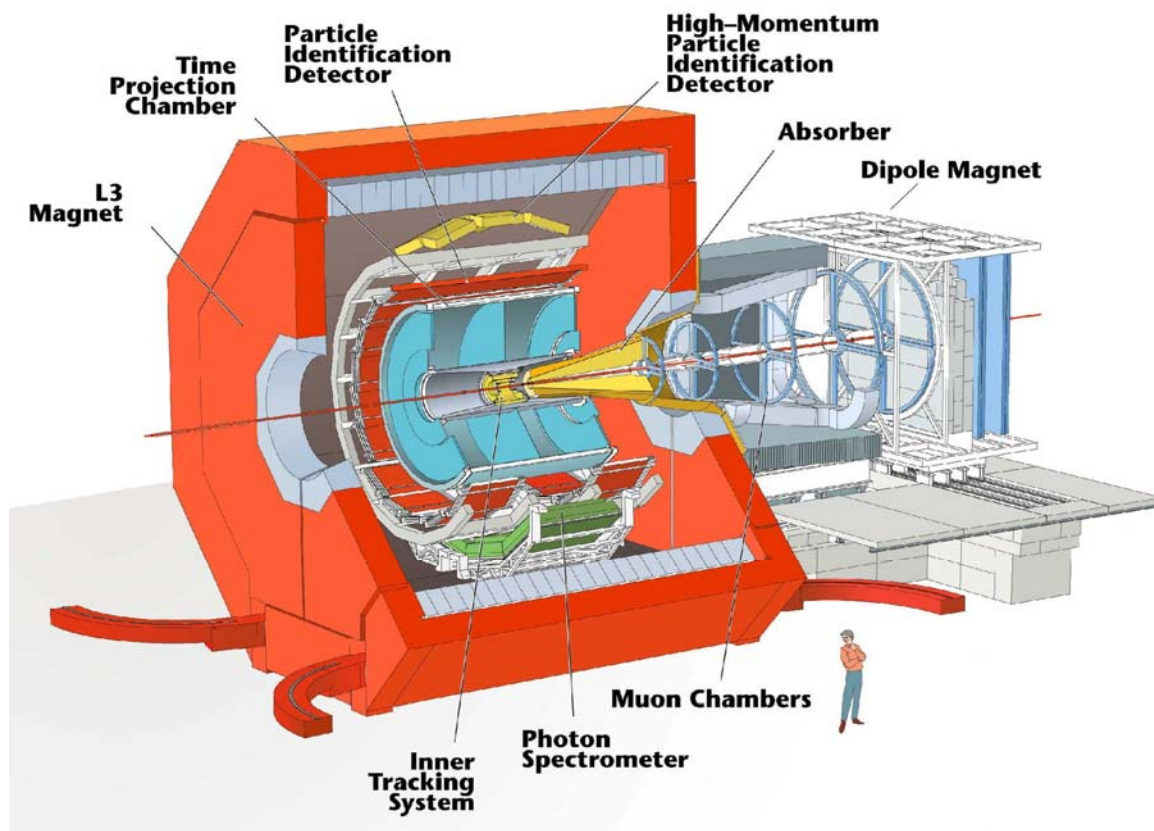


Рис. 1. Внешний вид детектора ALICE. Мюонный спектрометр изображен с правой стороны рисунка

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/ψ , ψ' , Υ , Υ' , Υ'' по их распаду на мюонные пары. Разрешение по массе составляет 100 МэВ при энергии 10 ГэВ, что достаточно для разрешения тонкой структуры Υ 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 (σ) 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 ± 100 мкм) расстояния катод-анод и одинаковости (в пределах ± 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 проволочек 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 ± 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 ± 15 мкм, а линия обрезки располагается по отношению к падам с точностью ± 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.

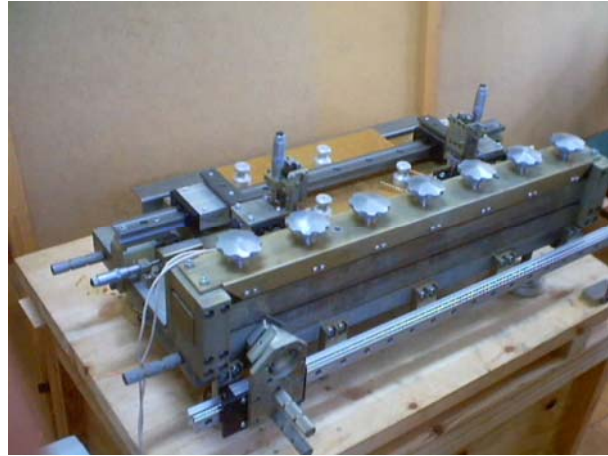


Рис. 2. Устройства обработки печатных плат, разработанные в ПИЯФ для станций 3, 4, 5 (слева) и для станции 2 (справа).

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].

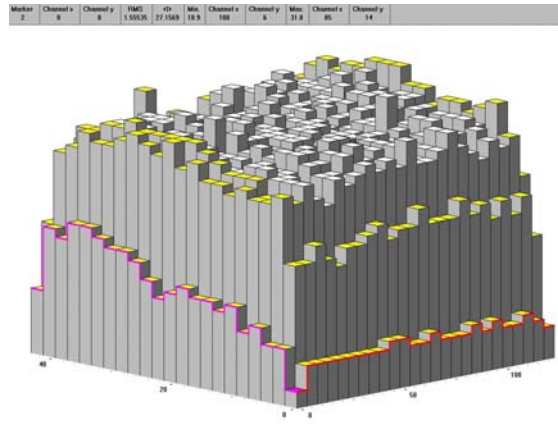
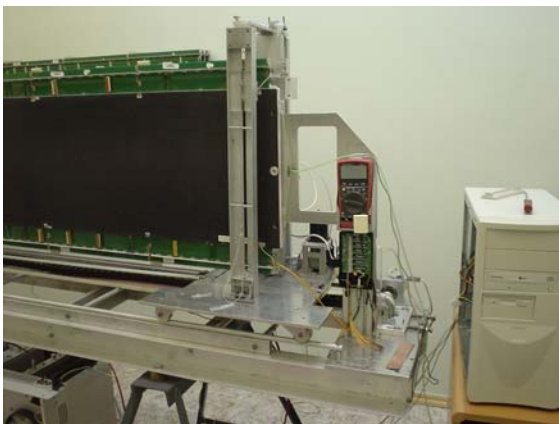


Рис. 3. Стенд для тестов с радиоактивным источником и пример распределения газового усиления в трековой камере.

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.

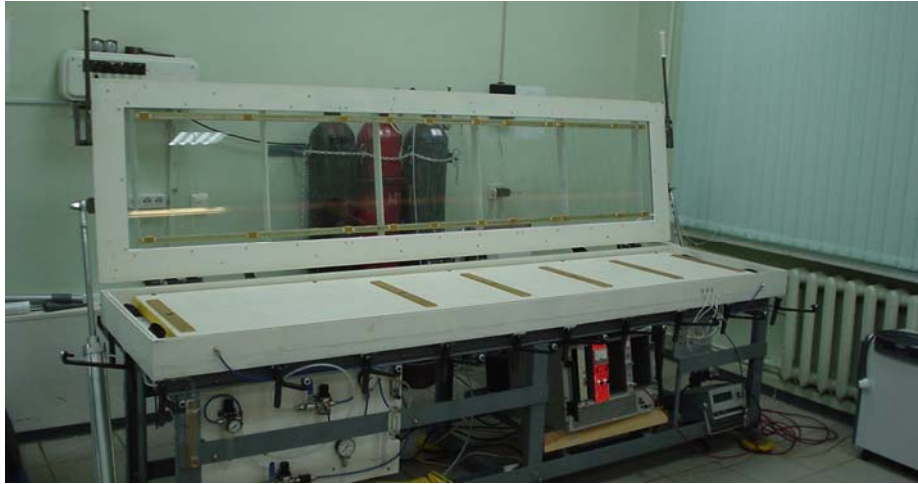


Рис. 4. Вид стенда для тестирования при высоком напряжении.

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.

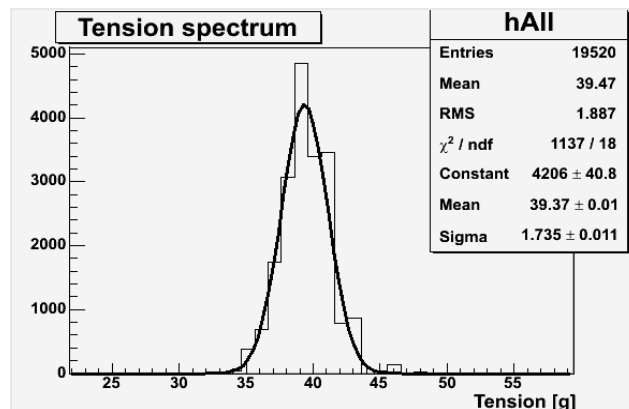


Рис. 5. Оборудование для измерения натяжения проволок и распределение натяжения, измеренное для примерно 20000 проволок в камерах, изготовленных в ПИЯФ.

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.

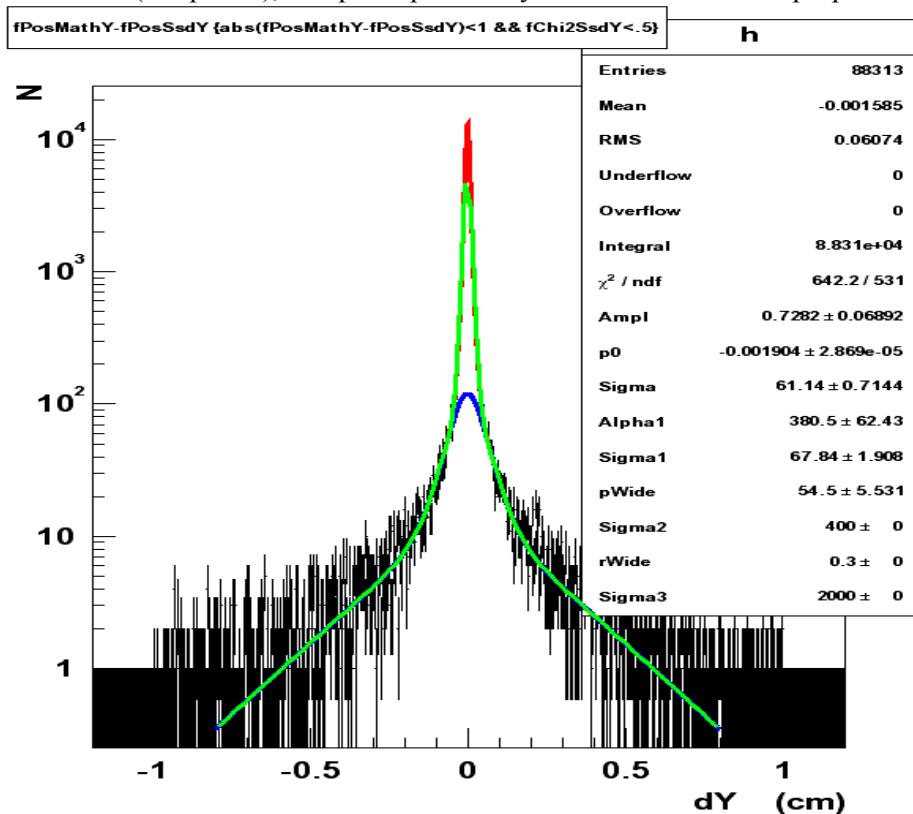


Рис. 6. Парметризация распределения остаточных отклонений, измеренного на PS. Можно различить узкую (70 микрон) и широкую (300 микрон) компоненту распределения.

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 (b), машина для намотки проволоки (d), и процесс установки сигнальных проволок на каркас (с).

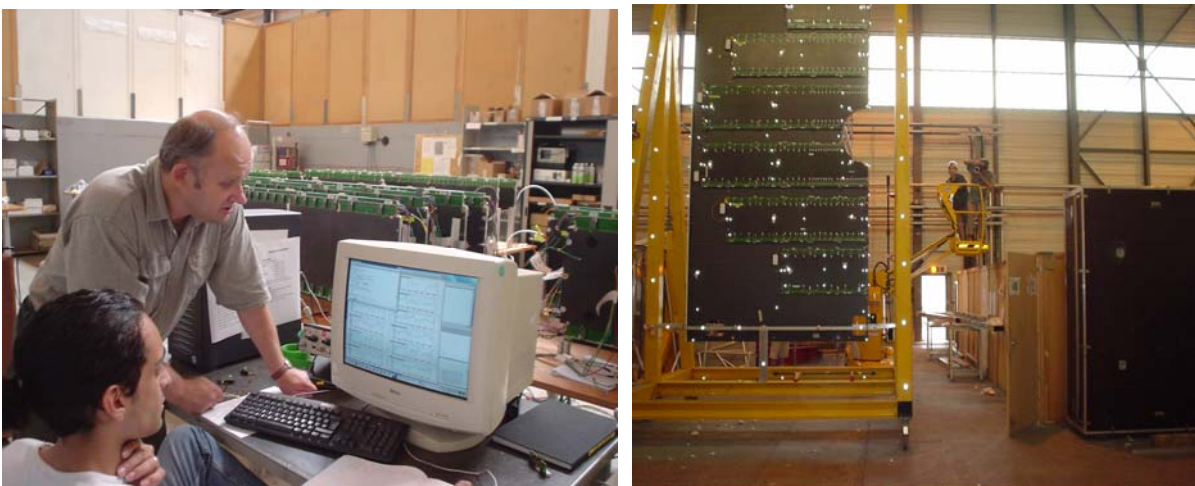


Рис. 8. Тесты трековых камер (слева) и собранная половина трековой станции (справа) в ЦЕРН.

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).

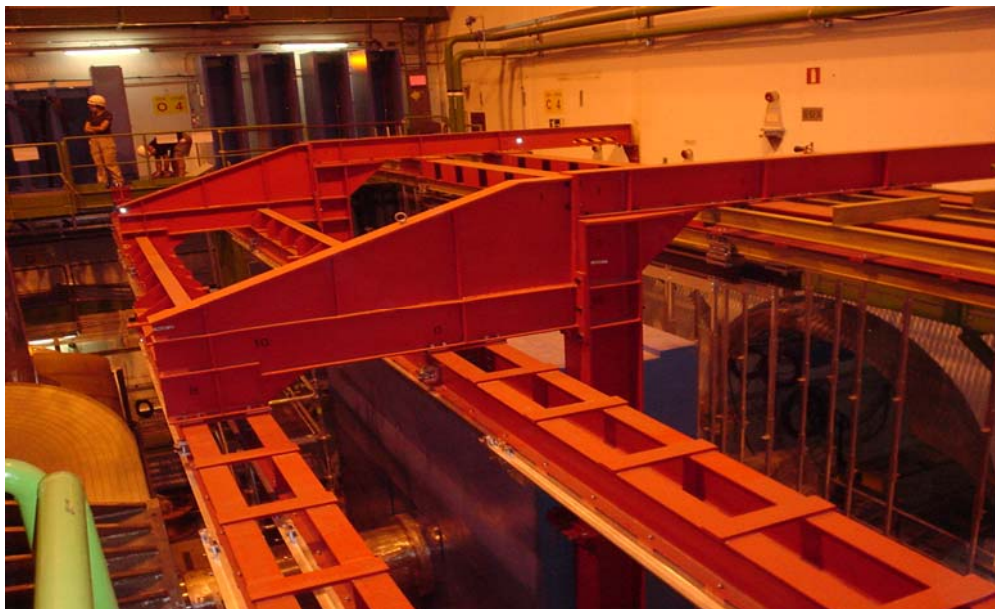


Рис. 9. Суперструктура для поддержки трековых и триггерных станций, разработанная группой ПИЯФ.

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)² 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.

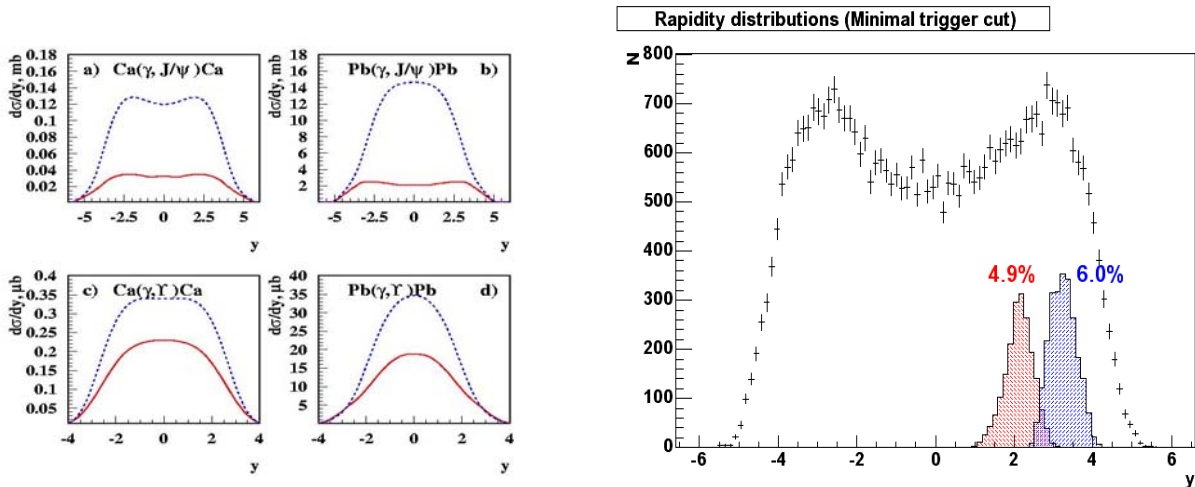


Рис. 11. Теоретические предсказания (слева) и результаты моделирования в AliRoot для когерентного фоторождения J/ψ (справа) как функция быстроты; синий пик соответствует случаю когда оба мюона детектируются в мюонном плече, красный пик соответствует случаю, когда один мюон регистрируется в мюонном плече, 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/Ψ 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/Ψ в ядро-ядерном взаимодействии представляется особенно интересным. В частности, подавление выхода J/Ψ 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/Ψ с адронами в конечном состоянии. Разумно предполагать, что измерение поляризации J/Ψ , 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/Ψ 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/Ψ 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).

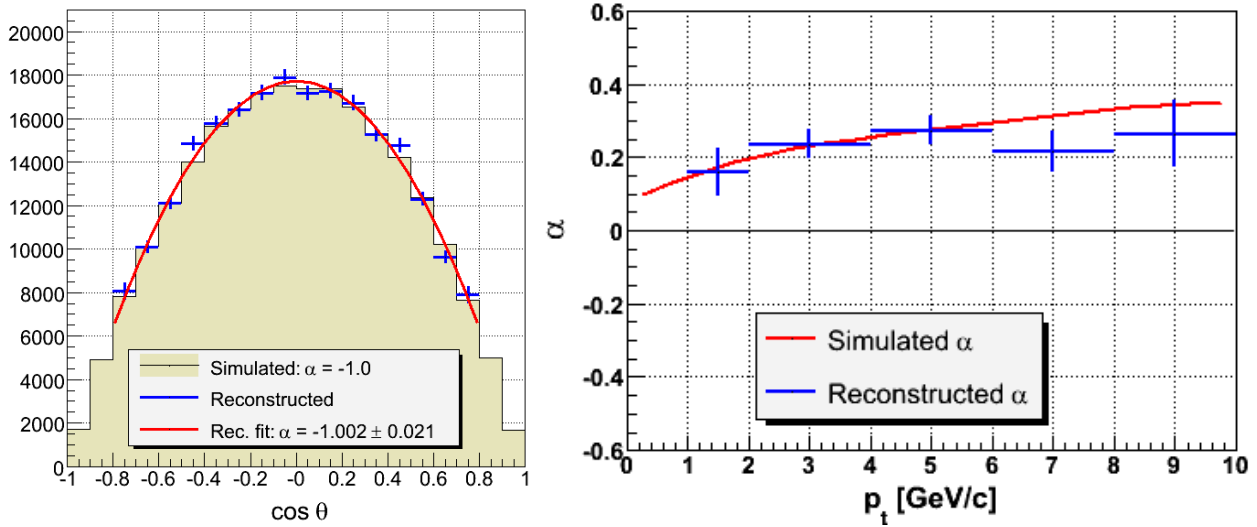


Рис. 12. Слева: распределения по $\cos\theta$ в случае продольной поляризации J/Ψ , смоделированные и реконструированные в диэлектронном канале в диапазоне поперечных импульсов от 4 до 6 ГэВ. Справа: смоделированные и реконструированные распределения параметра поляризации в пяти бинах по поперечному 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/ψ 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/ψ polarization studies with the ALICE central barrel”, “ J/ψ acceptance in barrel in first pp run”. PW G-3 Report, 18 April 2006.