

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 λ_I . Соответствующие значения в ТП: 40% от X_0 и 10% от λ_I .

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

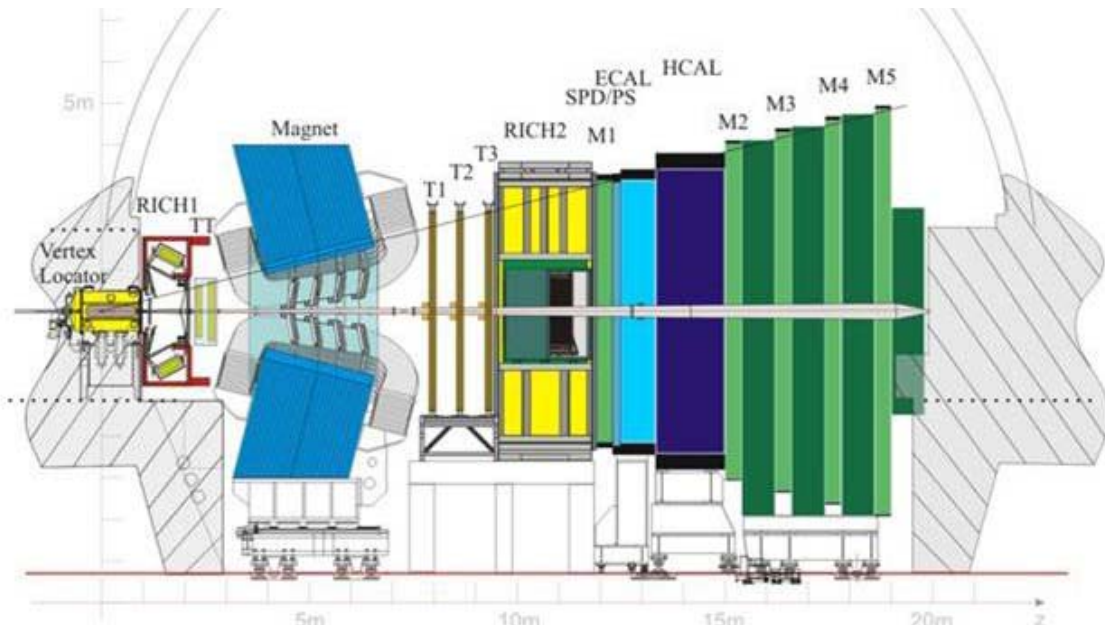


Рис. 1. Схема реоптимизированного детектора LHCb, показывающая вертексный детектор VELO, дипольный магнит, черенковские детекторы RICH1 и RICH2, трековые станции TT, T1, T2, T3, сцинтилляционный падовый детектор SPD, предливневый детектор PS, электромагнитный калориметр ECAL, адронный калориметр HCAL 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 м² (M1) до 106 м² (M5).

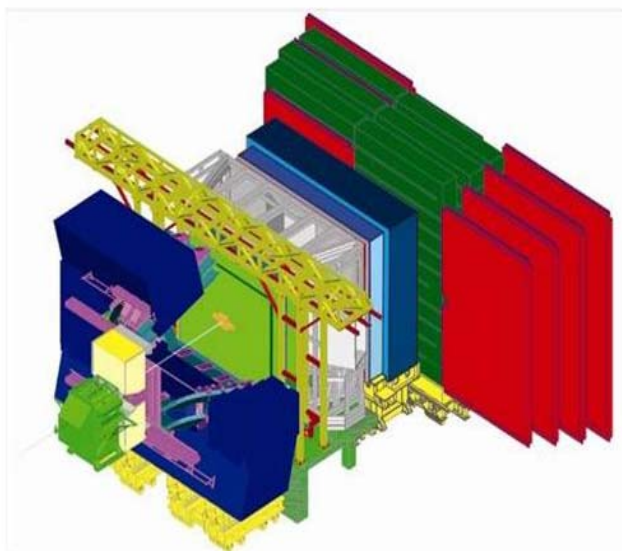


Рис. 2. Изображение детектора ЛНСб. Мюонные станции M2-M3 (красный цвет) могут выдвигаться в стороны от линии пучка для обеспечения доступа. На рисунке изображена правосторонняя часть детекторов в положении технического обслуживания.

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 М1 меняются от 200 кГц/см² в области вблизи пучковой трубы до 10 кГц/см² во внешней области. Фоновая нагрузка в станциях М2-М5 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 М1-М5 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-ззорные камеры (TGC) и резистивные плоские камеры (RPC). После всесторонних исследований, ЛНСб коллаборация выбрала предложенные ПИЯФ мюонные камеры для всей мюонной системы, за исключением небольшого, но особенно “горячего” региона R1 станции М1, 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 (М1, R1-R4) до 31 см (М5, R1-R4) и длина камеры L – от 24-37 см (R1, М1-М5) до 96-150 см (R4, М1-М5). 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.

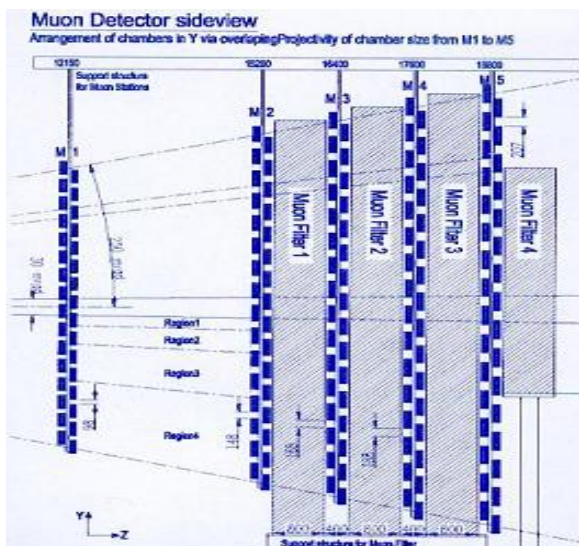


Рис. 3. Мюонная система, вид сбоку в плоскости YZ.

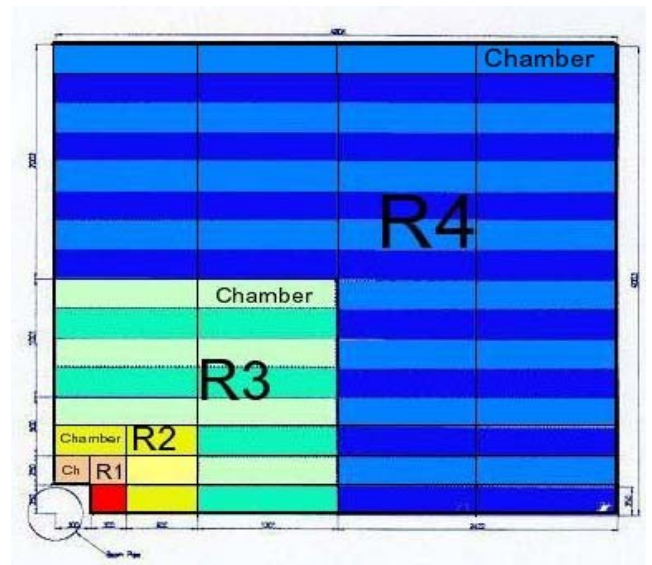


Рис. 4. Правый верхний квадрант станции М2, вид в плоскости XY. Регионы R4, R3, R2 и R1 окрашены, соответственно, голубым, зеленым, желтым и красным цветом.

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 $NV \leq 3,2 \text{ кВ}$.

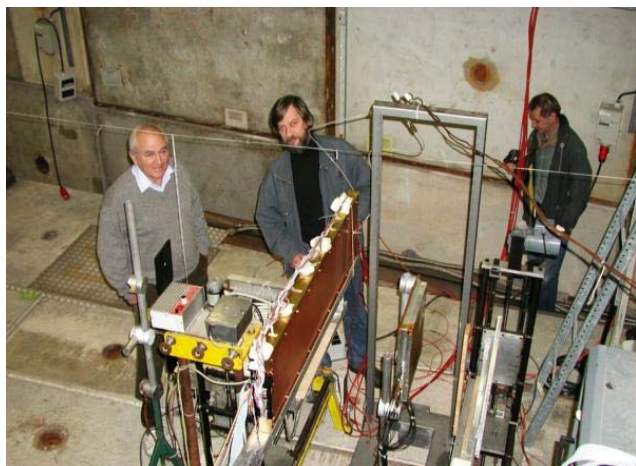


Рис. 5. Один из созданных в ПИЯФ прототипов мюонных камер на тестовом пучке T11 в ЦЕРН. В общей сложности, 10 прототипов мюонных камер было создано в ПИЯФ и протестировано на 3 ГэВ пионном пучке в ЦЕРН. Результаты этих работ были решающими при выборе предложения по конструкции детектора для Мюонной Системы 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 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 РНПИ-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 γ -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 <1 мкА) и 100 нА (для тока >1мкА). 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.

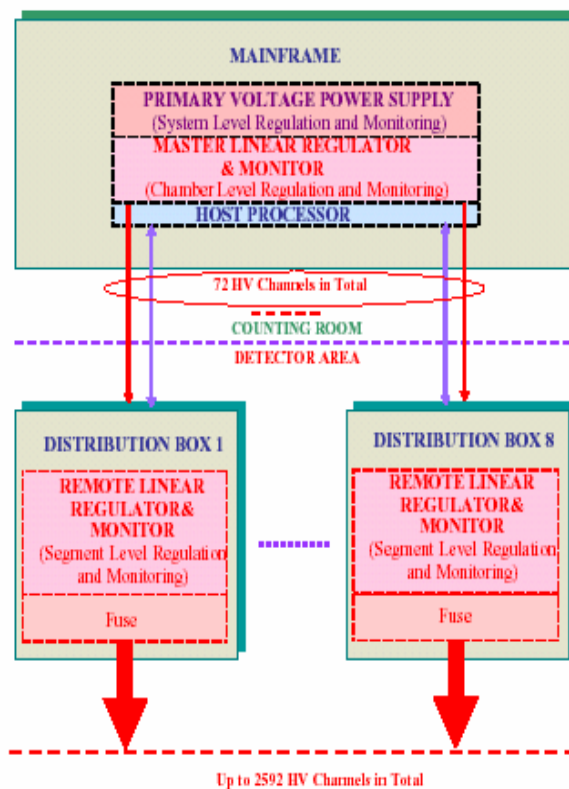


Рис. 21. Блок-схема высоковольтного источника питания для мюонного детектора LHCb.

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.