

81612

М-741

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

13-2007-10

На правах рукописи  
УДК 539.1.074:621.382

**МОВЧАН**  
Сергей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ КАТОДНО-СТРИПОВОЙ КАМЕРЫ  
ДЛЯ МЮОННОЙ СТАНЦИИ ME1/1  
УСТАНОВКИ КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД  
(CMS)**

Специальность: 01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Объединенный институт  
ядерных исследований  
Бюбна 2007

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований.

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук                      Моисенз Петр Владимирович

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор    Ермолов Павел Федорович

доктор физико-математических наук,  
профессор    Ажгирей Леонид Степанович

**Ведущая организация:**

"Государственный научный центр Российской Федерации –  
Институт физики высоких энергий", г.Протвино Московской обл.

Защита диссертации состоится “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д-720.001.05 в Лаборатории физики  
частиц Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна  
Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФЧ ОИЯИ.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Кривохижин Василий Геннадиевич

**Общая характеристика работы.**

**Актуальность.** Компактный мюонный соленоид (CMS) является одной из двух крупнейших установок, создаваемых для работы на Большом Адронном Коллайдере (LHC).

Согласно Стандартной Модели структура материи может быть представлена посредством двух семейств частиц - лептонов и кварков (каждое из которых подразделяется на 3 поколения) и четырех фундаментальных взаимодействий - электромагнитного, слабого и сильного ядерного и гравитационного.

Теория объединения электромагнитного и слабого взаимодействий позволила сделать шаг вперед в понимании фундаментальных взаимодействий. Тем не менее, Стандартная Модель все еще оставляет много вопросов без ответа: например, не объясняет механизм приобретения массы частицами. Также теорией не объяснен тот факт, что кварки и лептоны имеют три поколения, существенно различающиеся по массе. Чтобы дать ответы на эти вопросы, теория Стандартной Модели была расширена - сделано предположение о существовании Хиггсовского поля взаимодействия массивных векторных бозонов  $W^\pm$  и  $Z_0$ . При этом масса частиц приобретается через механизм спонтанного нарушения симметрии. Однако и этого еще недостаточно для представления целостной картины строения материи. Кроме того, Стандартная Модель не включает теорию гравитации.

Несколько теорий были сформулированы для того, чтобы ответить на вопросы, неохватываемые Стандартной Моделью. Наиболее популярна в настоящее время теория Суперсимметрии (SUSY). Основное предположение теории SUSY основано на том, что для каждой известной элементарной частицы существует супер-частица с равным зарядом. Для каждого кварка имеется соответствующий с-кварк и аналогично существуют с-лептоны, нейтролины, глюины и т.д. Еще одна популярная теория - Минимальное Суперсимметричное расширение Стандартной Модели (MSSM) - ограничивается введением всего пяти суперсимметричных частиц.

С помощью нового поколения физических установок на Большом Адронном Коллайдере, создаваемом в Европейском Центре Ядерных Исследований (CERN), может быть измерена масса Хиггсовского бозона.

Повышенные требования к характеристикам детектирующих систем, большое количество каналов регистрации и очень ограниченное место для размещения детекторов и электроники регистрации влекут за собой ряд серьезных требований к их разработке.

Многопроволочная пропорциональная камера с катодным считыванием информации со стрипов (катодно-стриповая камера, CSC) выбрана в качестве базового детектора для торцевых мюонных систем крупнейших экспериментов CMS и ATLAS. Катодно-стриповая камера сочетает в себе все необходимые для решения физической задачи свойства:

- определение координаты мюона с точностью лучше 50 мкм;

- высокое быстродействие, необходимое для формирования триггера первого уровня. Время сбора электронов первичной ионизации не превышает 100 нс;
- возможность работы в условиях высоких фоновых нагрузок порядка (1-3) кГц/см<sup>2</sup>;
- возможность работы в магнитном поле ~ 3 Тесла.

Координатная точность камер мюонной станции ME1/1 играет определяющую роль в обеспечении необходимого энергетического разрешения торцевой мюонной системы установки CMS. Близкое расположение станции к внутреннему трекеру определяет высокие требования к эффективности и точности определения пространственной координаты мюона для восстановления его трека в точку взаимодействия пучков.

**Цель диссертационной работы.** Разработка концепции катодно-стриповой камеры для мюонной станции ME1/1 эксперимента CMS.

Исследование характеристик прототипов катодно-стриповой камеры:

- с помощью мюонных и пионных пучков в магнитном поле разной величины;
- в условиях, близких к реальным для мюонной станции ME1/1 в эксперименте CMS;
- определение оптимального режима работы камеры по газовому усилению для разработанной электроники считывания информации с ее стрипов и проволочек.

Экспериментально доказать, что параметры камеры удовлетворяют требованиям эксперимента CMS.

**Научная новизна работы.** В диссертационной работе приведены новые результаты экспериментальных исследований характеристик катодно-стриповой камеры:

- влияние магнитного поля на координатное разрешение камеры;
- влияние электромагнитного сопровождения, индуцируемого мюонами в веществе, на координатное разрешение камеры и эффективность реконструкции мюонных треков;
- исследованы триггерные свойства камеры. Показана возможность идентификации трека заряженной частицы и определение момента ее прохождения через камеру с помощью сигналов с анодных и быстрых катодных каналов регистрации;
- исследовано влияние больших фоновых нагрузок на характеристики камеры;
- исследовано влияние коэффициента газового усиления на ее характеристики.

**Практическая ценность работы.**

- Разработана и оптимизирована концепция камеры для мюонной станции ME1/1.

- Результаты экспериментальных исследований показали, что параметры камеры удовлетворяют требованиям эксперимента CMS. Это позволило создать мюонную станцию ME1/1.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертации изложены в 9 работах, список которых приведен в конце автореферата. Результаты исследований неоднократно докладывались на общелабораторных семинарах в ЛФЧ ОИЯИ, на семинарах коллаборации CMS в ЦЕРН, а также на следующих международных совещаниях и конференциях:

1. First Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, December 11-15, 1995.
2. Second Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, December 16-17, 1996.
3. Third Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, December 16-17, 1997.
4. CMS Endcap Muon Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, June 14, 1998.
5. Proceedings of ME1/1 Engineering Design Review, CMS Document 99-047, CERN, Geneva, Switzerland, June 21-23, 1999.
6. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Advanced Technology @ Particle Physics (ICATPP-7), World Scientific, 2002, pp.347-351.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация объемом 160 страниц состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 11 таблиц, 99 рисунков и список цитируемой литературы из 59 ссылок.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 9 работ, в том числе в журналах «Письма в ЭЧАЯ», «JINR Rapid Communications», «Computer Physics Communications» и ПТЭ.

#### **Содержание диссертации.**

**Во введении** подчеркнута актуальность исследований, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** приведено краткое описание и основные характеристики «Большого Адронного Коллайдера» (LHC). Рассмотрено назначение создаваемых для работы на LHC экспериментальных установок. Дано краткое описание установки «Компактный мюонный соленоид» (CMS). Общий вид установки показан на Рис.1. Торцевая часть мюонного спектрометра состоит из 4 станций. Первая станция ME1 состоит из 3-х перекрывающихся между собой по R-координате колец детекторов – ME1/1, ME1/2 и ME1/3. Станция ME1/1 – самое внутреннее кольцо детекторов – расположена на расстоянии 6 метров от точки взаимодействия пучков и на расстоянии 1 метр от оси пучков. Она находится непосредственно за адронным калориметром и перекрывает диапазон по псевдобыстродам от 1,6 до 2,4. Станция ME1/1 расположена в сильном акси-

альном магнитном поле соленоида (в отличие от остальных станций). Она состоит из 72 камер трапециидальной формы. Общая чувствительная площадь камер около 34 м<sup>2</sup>.

Для достижения требуемого разрешения по импульсу всей торцевой мюонной системы, камеры мюонной станции ME1/1 должны обеспечивать координатное разрешение  $\sigma \sim 75$  мкм. Эффективность восстановления треков мюонов должна быть близка к 100%. Для определения момента столкновения пучков необходимо временное разрешение  $\sim 4$  нс. Камеры мюонной станции ME1/1 должны работать в аксиальном магнитном поле соленоида величиной  $\sim 3$  Тесла с радиальной составляющей  $\sim 0,3$  Тесла. Станция должна обеспечить требуемые параметры при фоновых нагрузках от заряженных частиц порядка 1,0 кГц/см<sup>2</sup>.

**Во второй главе** изложены принцип работы газоразрядных детекторов. Обоснован выбор пропорциональной камеры с катодным считыванием информации со стрипов в качестве базового детектора для применения в торцевом мюонном спектрометре эксперимента CMS. Сформулирована программа экспериментальных исследований характеристик катодно-стриповой камеры для мюонной станции ME1/1.

**Третья глава** посвящена описанию методических результатов по экспериментальному исследованию характеристик катодно-стриповой камеры.

Описаны методы получения координаты мюона по информации со стрипов катодно-стриповой камеры [1].

Применен метод компенсации влияния магнитного поля на координатное разрешение камеры путем поворота анодных проволочек на соответствующий угол относительно оси камеры (центрального стрипа). С целью оптимизации угла наклона анодных проволочек была создана программа моделирования координатного разрешения камеры учитывающая величину зазора анод-катод камеры, шаг анодных проволочек и их диаметр, свойства используемой газовой смеси, величину магнитного поля и величину газового усиления [7]. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными измерениями.

Изучено влияние магнитного поля на координатное разрешение камеры.

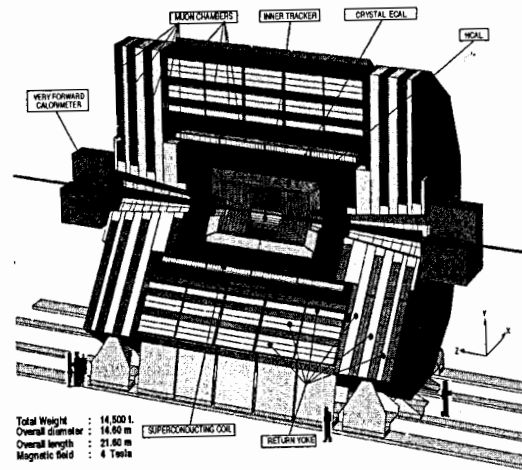


Рис.1 Общий вид установки "Компактный мюонный соленоид" (CMS)

Прототип P0 сыграл историческую роль в выборе типа детектора для торцевого мюонного спектрометра эксперимента CMS. С его помощью была показана возможность точной реконструкции треков мюонов в магнитном поле величиной 3 Тесла. Кроме того, при изготовлении камеры была отработана технология ее сборки, обеспечивающая величину несоосности стрипов для разных плоскостей камеры порядка нескольких десятков микрон. В дальнейшем эта технология была использована при изготовлении всех прототипов камеры и далее при серийном производстве камер для мюонной станции ME1/1.

Прототип P0 представлял собой 4-х слойную пропорциональную камеру прямоугольной формы размером 0,5x0,5 м<sup>2</sup>, т.е. состоял из 4 идентичных субкамер. Величина зазора анод-катод была равна 2,5 мм. Диаметр анодных проволочек – 30 мкм, шаг проволочек – 2,5 мм. Один из катодов в каждой плоскости был выполнен в виде параллельных стрипов с шагом считывания 5,08 мм. Механическая точность сборки камеры (несоосность стрипов для разных плоскостей камеры) была обеспечена на уровне не хуже 40 мкм. Использовалась быстрая рабочая газовая смесь с добавкой CF<sub>4</sub> – Ar(30%)+CF<sub>4</sub>(20%)+CO<sub>2</sub>(50%).

Для исследования характеристик прототипа была разработана электроника считывания информации со стрипов на базе зарядового предусилителя фирмы LeCroy HQV820. Считывание информации с катодных стрипов организовано на основе однократной схемы выборки и хранения информации с последующей оцифровкой. Для считывания информации с анодных проволочек был применен токовый усилитель «ГАРАНТИЯ», разработанный в ИФВЭ, Протвино.

С помощью этого прототипа было исследовано координатное и временное разрешение камеры, влияние магнитного поля на координатное разрешение камеры. Впервые показана возможность работы катодно-стриповой камеры в магнитном поле величиной 3 Тесла, что предопределило ее выбор в качестве детектора для торцевого мюонного спектрометра эксперимента CMS.

Показано, что координатное разрешение для одной плоскости камеры равно  $\sigma \sim 50$  мкм (Рис.2), а ее временное разрешение при считывании информации с 4 анодов по схеме

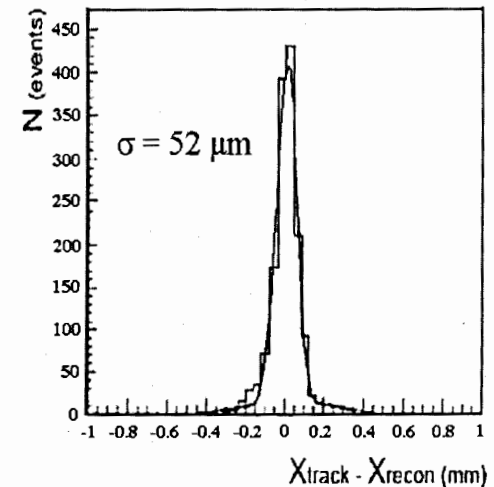


Рис.2 Координатное разрешение для одной плоскости прототипа P0

“или” -  $\sigma \sim 2,9$  нс. Наличие магнитного поля приводит к смещению направления дрейфа электронов первичной ионизации к анодным проволочкам и, как следствие этого, координатное разрешение камеры деградирует. Эффект влияния нормальной составляющей магнитного поля может быть скомпенсирован наклоном анодных проволочек на соответствующий угол по отношению к стрипам камеры (угол Лоренца,  $\alpha_L$ ). Величина угла зависит от величины магнитного поля.

Конструкция полномасштабных прототипов P1 и P2 камеры мюонной станции ME1/1 была существенно модернизирована: количество катодных плоскостей увеличено с 4-х до 6, введена радиальная форма стрипов. Анодные проволочки наклонены по отношению к нормали к оси камеры на эффективный угол Лоренца для компенсации эффекта влияния магнитного поля величиной 3 Тесла.

Для экспериментального исследования характеристик прототипа P2 было разработано и изготовлено новое поколение электроники регистрации информации с CSC.

Считывание информации с катодных стрипов было организовано на основе аналогового процессора GASPLEX, специально разработанного для работы с газовыми детекторами. После зарядо-чувствительного предусилителя, оптимизированного на работу с детекторами, имеющими большую емкость, стоит фильтр, компенсирующий логарифмическую форму зарядового сигнала с камеры и тем самым повышающий быстродействие канала регистрации. Время восстановления базовой линии канала эквивалентно 5,6 мкс.

Анодная электроника была разработана на базе быстрого токового предусилителя-формирователя MSD-2 фирмы LABEN.

С помощью прототипа P2 было исследовано координатное и временное разрешение камеры, изучено влияние электромагнитного сопровождения на характеристики камеры.

Способ компенсации эффекта влияния магнитного поля на координатное разрешение камеры путем поворота анодных проволочек по отношению к стрипам позволяет получить координатное разрешение на уровне 50 мкм. Зависимость координатной точности для одной плоскости камеры от величины магнитного поля для  $\alpha_L = 21,2^\circ$  приведена на Рис.3.

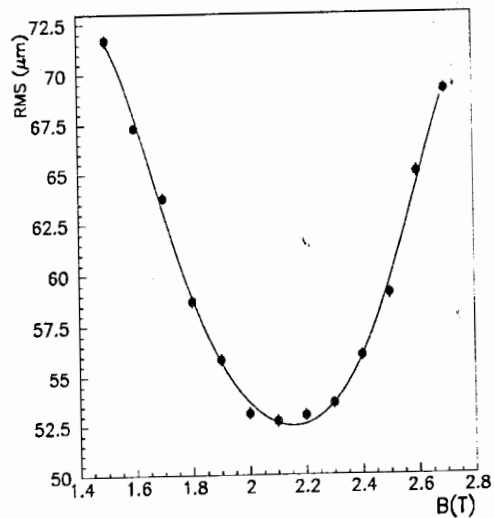


Рис.3 Зависимость координатного разрешения для одной плоскости прототипа P2 от величины магнитного поля

Зависимость величины угла Лоренца ( $\text{tg } \alpha_L$ ) от величины нормальной составляющей магнитного поля для газовой смеси Ar/CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> разного процентного состава приведена на Рис.4. Видна слабая зависимость величины угла от состава газовой смеси [7].

Временное разрешение камеры равно  $\sigma \sim 2,1$  нс при считывании информации с анодов.

Изучался эффект влияния электромагнитного сопровождения, генерируемого высокоэнергетичными мюонами проходящими через адронный калориметр, на эффективность реконструкции мюонных треков. Показано, что наличие 6 плоскостей (6 субкамер) в камере наиболее оптимально с точки зрения эффективности реконструкции треков мюонов с электромагнитным сопровождением (Рис.5)[2].

P3 – шести слойный полномасштабный прототип камеры мюонной станции ME1/1. В его конструкции учтены результаты исследований и опыт работы с предшествующими прототипами. Для уменьшения загрузки катодных каналов регистрации стрипы разрезаны на 2 части и считываются независимо с двух сторон. Область раздела стрипов ( $\eta=2,0$ ) выбрана таким образом, чтобы загрузка каналов регистрации для обеих частей камеры была одинакова. Величина зазора анод-катод увеличена до 2,8 мм.

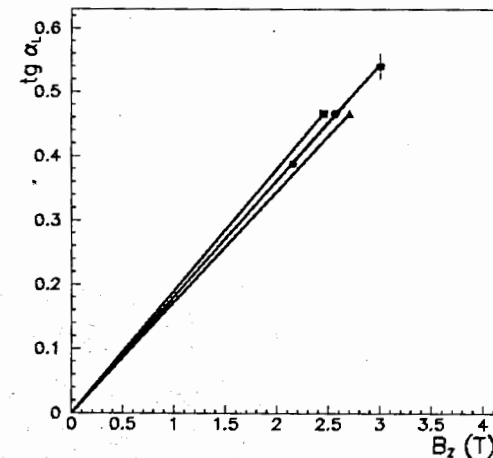


Рис.4 Зависимость величины угла Лоренца ( $\text{tg } \alpha_L$ ) от величины нормальной составляющей магнитного поля для газовой смеси Ar/CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> различного процентного состава: ■ - 40:10:50, ● - 30:20:50, ▲ - 30:10:60

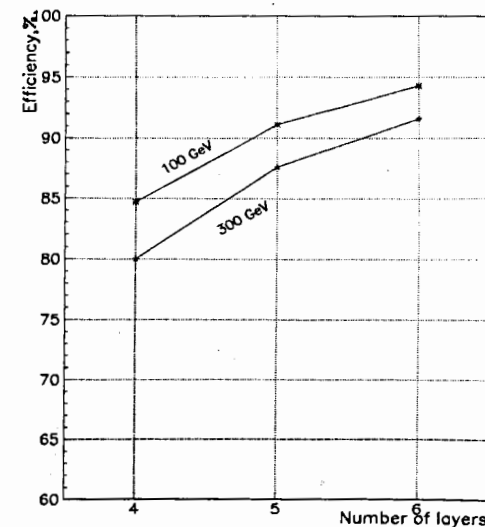


Рис.5 Зависимость эффективности реконструкции мюонных треков от количества плоскостей в камере

С целью оптимизации угла наклона анодных проволочек относительно стрипов была создана программа моделирования координатного разрешения камеры учитывающая величину зазора анод-катод, шаг анодных проволочек и их диаметр, состав газовой смеси, величину магнитного поля и величину газового усиления. Результаты моделирования неоднократно проверены экспериментальными данными, полученными при исследовании различных прототипов. Зависимость величины координатного разрешения по площади для одной из плоскостей камеры (субкамеры) приведена на Рис.6 [7].

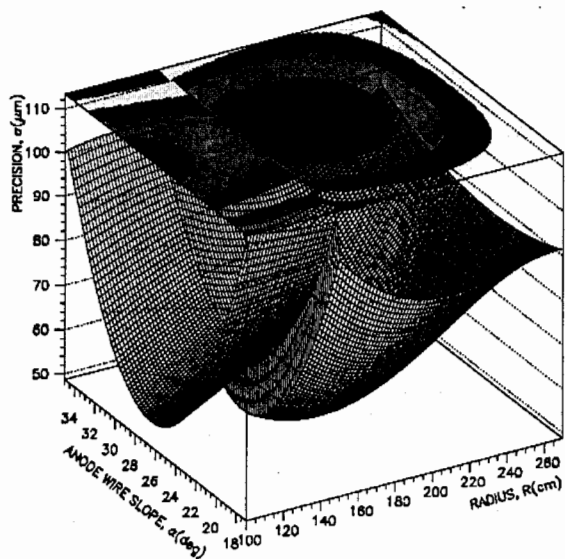


Рис.6 Зависимость величины координатного разрешения по площади для одной плоскости камеры (моделирование)

Моделирование выполнено для газовой смеси  $Ar(30\%)+CF_4(10\%)+CO_2(60\%)$ , газового усиления  $G \sim 10^5$ , величины магнитного поля  $\sim 3$  Тесла, соотношения радиальной и азимутальной компонент магнитного поля  $\sim 0,1$  и величины зазора анод-катод  $3,5$  мм, шага анодных проволочек  $2,5$  мм и их диаметра  $30$  мкм. Оптимальная величина эффективного угла наклона анодных проволочек равна  $\alpha_L = 29,5^\circ$  [7].

Экспериментально исследовано временное разрешение камеры [6,8]. При исследованиях прототипов P3 и P4 использовалась электроника регистрации со стрипов на основе специализированных больших интегральных схем КАТОД-1 (16-ти канальный зарядочувствительный предусилитель-формирователь) и КАТОД-3 (16-ти канальный формирователь-дискриминатор быстрого катодного канала). Анодная электроника была изготовлена на базе токового предусилителя-формирователя MSD-2. Прототип P3 был развернут на угол  $\theta = 10^\circ$  к оси пучка для имитации геометрии положения камеры в установке

CMS. Временные спектры сигналов с анодных каналов и быстрых катодных каналов регистрации имеют похожую форму с шириной по основанию около  $30$  нс и  $40$  нс соответственно (Рис.7).

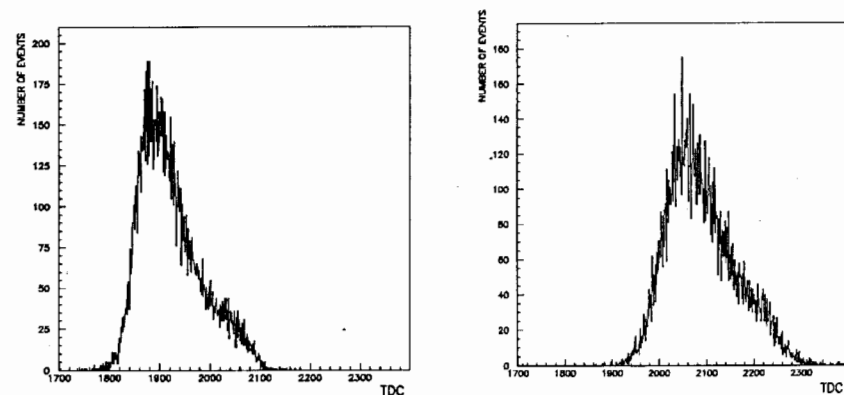


Рис.7 Форма временного спектра для одной плоскости прототипа P3 при считывании информации с анода (слево) и стрипов (справо). Цена деления ВЦП –  $0,1$  нс/канал

На Рис.8 представлены временные распределения для шести последовательно приходящих во времени сигналов с 6 анодных плоскостей камеры. Величина временных спектров по основанию (для 99% событий) составляет значение для 1го сигнала –  $10,5$  нс, для 2го –  $12$  нс, для 3го –  $14$  нс, для 4го –  $16,5$  нс, для 5го –  $22,5$  нс, для 6го –  $26,5$  нс [8].

Показано, что:

- координатное разрешение для одной плоскости камеры в магнитном поле величиной  $\sim 3$  Тесла равно  $\sigma \sim 50$  мкм. Влияние магнитного поля компенсируется путем поворота анодных проволочек на

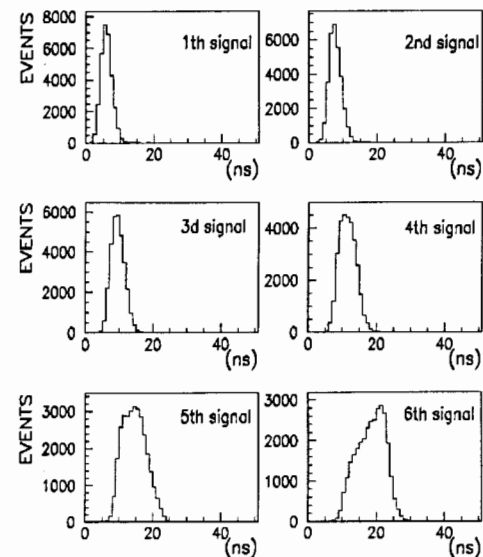


Рис.8 Временные распределения для шести последовательно приходящих сигналов с 6 анодных плоскостей прототипа P3

соответствующий угол Лоренца относительно стрипов;

- для обеспечения высокой эффективности реконструкции мюонных треков необходимо наличие как минимум 6 плоскостей (6 субкамер) в камере;
- возможна однозначная привязка событий к времени взаимодействия пучков в коллайдере за время 25 нс, при этом все пять анодных сигналов могут служить временной меткой события. Мажоритарные совпадения (4/6) сигналов с 6 анодных и 6 катодных плоскостей камеры в заданной геометрии определяют принадлежность события к треку от заряженной частицы. В CMS принято, что временная метка события делается по второму анодному временному сигналу, а идентификация события как трека подтверждается мажоритарными совпадениями анодных и катодных сигналов в течении 50 нс.

**Четвертая глава** посвящена описанию исследования характеристик прототипов P2-P4 камеры мюонной станции ME1/1 в условиях, близких к реальным в эксперименте CMS.

Для получения достоверных оценок координатного разрешения камеры и эффективности реконструкции треков мюонов наряду с методом максимума правдоподобия применен метод робастного фитирования треков мюонов в условиях большого количества сопутствующих треков [3,9]. Метод позволяет получить оценку координатное разрешение камеры в 1,5 раза лучше по сравнению с методом МНК. Суть метода заключается в том, что для хитов в сработавших плоскостях камеры вводятся особые весовые коэффициенты. Чем дальше хит от координаты предполагаемого трека, тем меньше он влияет на итерационную процедуру фитирования. Начальное приближение может быть получено методом МНК.

Эффект влияния коррелированного фона (электромагнитного сопровождения, генерируемого высокоэнергетичными мюонами, проходящими через материал поглотителя адронного калориметра) исследовался с помощью прототипа P2 на канале H2, ЦЕРН, в магнитном поле величиной 3 Тесла. Измеренная вероятность образования вторичных треков в CSC от электро-магнитного сопровождения мюона составила величину 22% для мюонов с импульсом 100 ГэВ/с и 29% для мюонов с импульсом 300 ГэВ/с. Многослойные катодно-стриповые камеры позволяют сохранить высокую координатную точность ( $\sigma \sim 75$  мкм) и эффективность реконструкции треков мюонов (на уровне 92-94%) в условиях присутствия электромагнитного сопровождения (Рис.9) [2].

Влияние некоррелированного фона на характеристики камеры исследовалось на прототипах P3 и P4 с помощью пионного пучка высокой интенсивности на канале H2, ЦЕРН (Рис.10) [5].

Режим работы прототипов по высокому напряжению был выбран таким образом, чтобы отношение сигнал/шум при считывании информации со стрипов было равно  $\sim 200$ . Это обеспечило заведомо высокое координатное разрешение камеры ( $\sim 65$  мкм на плоскость) в условиях отсутствия фона.

Исследования показали, что при нагрузках  $\sim 100$  кГц/канал:

- координатное разрешение для одной плоскости камеры равно  $\sigma \sim 70$  мкм при эффективности реконструкции треков пионов  $\sim 96\%$ ;
- эффективность регистрации треков для одной плоскости камеры по информации с быстрых катодных каналов (с точностью  $\pm 0,5$  ширины стрипа) составила величину  $\sim 94\%$ .

Исследования прототипа P3 на стенде «Gamma irradiation facility» (GIF, ЦЕРН) с высокоинтенсивным гамма источником  $Cs^{137}$  ( $N=2 \times 10^6$   $\gamma/cm^2$ ,  $E_\gamma=662$  кэВ) дали возможность изучить нагрузочную способность камеры. Деграция временного разрешения камеры при считывании информации с анодных проволо-

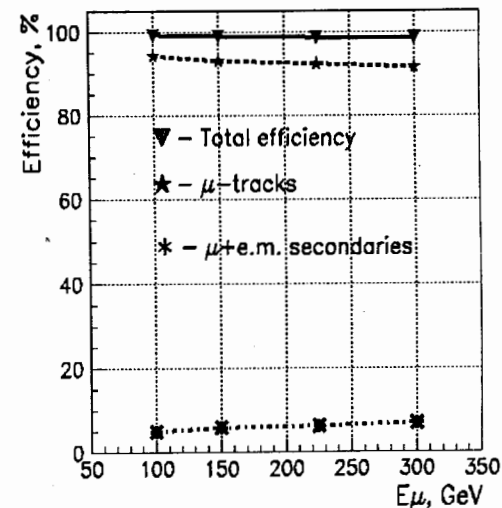


Рис.9 Зависимость эффективности реконструкции мюонных треков от их энергии

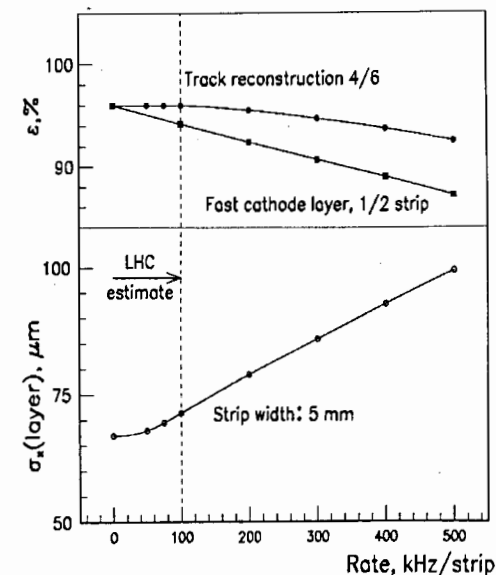


Рис.10 Зависимость координатного разрешения для одной плоскости камеры и эффективности реконструкции мюонов от величины некоррелированного фона для прототипа P4

чек исследовалась в зависимости от интенсивности некоррелированного фона, создаваемого гамма источником. Набор поглощающих фильтров с диапазоном ослабления  $K=1 \div 10^4$  обеспечивал изменение интенсивности фонового излучения. Фактор ослабления  $K=34 \pm 1$  соответствует максимальной величине ожидаемых нагрузок для мюонной станции ME1/1  $\sim 100$  кГц на канал считывания.

Полученные результаты демонстрируют работоспособность камеры и электроники считывания при фоновых нагрузках более чем на порядок превышающих ожидаемые в эксперименте. Временное разрешение камеры начинает деградировать при факторе ослабления 10. Фоновые нагрузки при этом превышают ожидаемые в 3,5 раза (Рис.11).

Прототип P4 [4] представляет собой шести слойный полномасштабный прототип камеры мюонной станции ME1/1. Особенность P4 состоит в том, что он произведен с использованием технологии, материалов и оборудования, предназначенных для серийного изготовления камер. Величина зазора анод-катод увеличена до 3,0 мм. Скорректирован угол наклона анодных проволочек -  $\alpha_L=25^\circ$ . Изменено количество каналов считывания со стрипов для каждой плоскости - в верхней части камеры стало 80 каналов, а в нижней - 48. Уменьшен размер камеры по высоте в ее верхней части из-за проблем с интеграцией камеры в установку CMS.

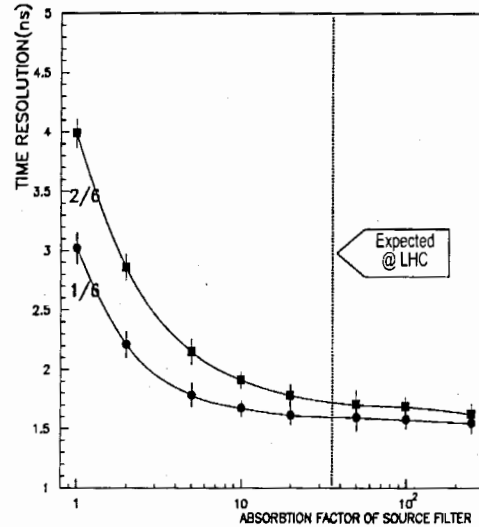


Рис.11 Зависимость временного разрешения прототипа P3 от величины некоррелированного фона

Катодная информация считывалась с помощью 96-канальной системы, разработанной на базе микросхем КАТОД-1 и КАТОД-3. Для регистрации информации с анодных проволочек была разработана 24 канальная плата на основе микросхемы АНОД.

Прототип P4 был исследован в мюонном пучке (канал H2, ЦЕРН) при наличии магнитного поля величиной  $\sim 3$  Тесла.

Экспериментальные результаты, характеризующие работу прототипа P4 в зависимости от значений высокого напряжения на камере (газового усиления Gas gain), представлены на рис.12 [1].

Проведен ряд экспериментов по изучению характеристик прототипа P4 в условиях, приближенных к реальным в установке CMS. В отсутствие коррелированного фона определены основные значения параметров камеры. Показано, что при:

- использовании газовой смеси  $Ar(30\%)+CF_4(10\%)+CO_2(60\%)$ ,
- газовом усилении  $\sim 6 \times 10^4$ ,
- наличии магнитного поля величиной  $\sim 3$  Тесла,
- и величине некоррелированных фоновых нагрузок до 100 кГц на канал регистрации

камера обеспечивает:

- координатное разрешение для мюонов  $\sigma$  не хуже 100 мкм на одну плоскость камеры (субкамеру) при эффективности реконструкции треков  $\sim 96\%$ ;
- временное разрешение камеры по анодным каналам регистрации -  $\sigma \sim 3$  нс и быстрым катодным каналам -  $\sigma \sim 4,5$  нс;
- точность определения координаты трека на плоскость камеры (субкамеру) по быстрым сигналам со стрипов равна  $\sigma \sim 0,54$  мм при эффективности регистрации в пределах  $\pm 1/2$  ширины стрипа  $\sim 94\%$ .

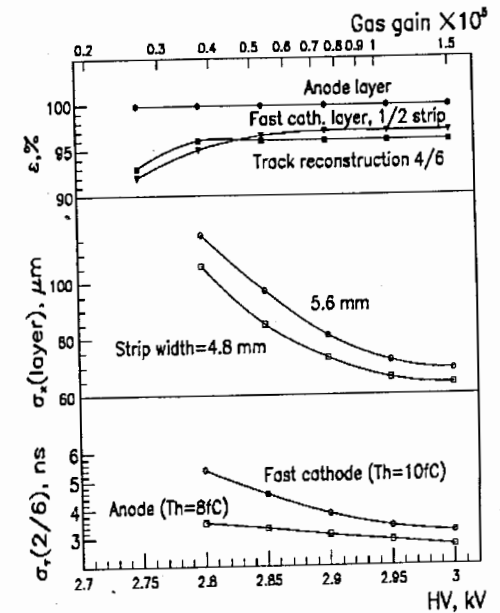


Рис.12 Зависимость эффективности регистрации, координатного и временного разрешения прототипа P4 от высокого напряжения на камере (коэффициента газового усиления)

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана концепция камеры для мюонной станции ME1/1. Камера выполнена в виде  $10^0$  сектора и состоит из 6 субкамер. Одна координата считывается с радиальных стрипов, а вторая - с проволочек, объединенных в группы. Считывание со стрипов разделено по радиусу на две части для уменьшения нагрузок на катодный канал считывания и оптимизации координатного разрешения для верхней и нижней частей камеры.



2. Проведены методические исследования характеристик камеры в мюонных и пионных пучках при наличии магнитного поля величиной до 3 Тесла. Ниже приведены впервые экспериментально полученные рекордные значения для ряда параметров камеры при регистрации мюонов (для коэффициента газового усиления  $G \sim 10^5$ ):

*координатное разрешение* для одной субкамеры равно:

- $\sigma \sim 50$  мкм при ширине стрипа 5 мм в отсутствии магнитного поля ( $\sigma$  равна 1/100 от ширины стрипа);
- $\sigma \sim 50$  мкм при величине магнитного поля  $B=3$  Тесла. Эффект влияния магнитного поля на координатное разрешение камеры компенсируется поворотом анодных проволочек на соответствующий угол Лоренца относительно стрипов;

*эффективность реконструкции мюонных треков:*

- показано, что наличие 6 субкамер в детекторе наиболее оптимально с точки зрения эффективности реконструкции трека мюона с электромагнитным сопровождением;
- в присутствии коррелированного фона:
  - вероятность появления сопровождения для мюонов с импульсом 100 ГэВ/с равна 22%, а для мюонов с импульсом 300 ГэВ/с - 28%;
  - эффективность реконструкции треков мюонов равна 94% для мюонов с импульсом 100 ГэВ/с и 92% - для мюонов с импульсом 300 ГэВ/с;

*временное разрешение камеры равно:*

- по анодным каналам регистрации  $\sigma \sim 1,6$  нс;
- по быстрым катодным каналам регистрации  $\sigma \sim 3$  нс;

*координатное разрешение для быстрых катодных каналов регистрации:*

- равно  $\sigma \sim 0,5$  мм (1/10 ширины стрипа) для одной субкамеры;

*эффективность регистрации трека частицы для анодных и быстрых катодных каналов:*

- эффективность мажоритарных совпадений (4/6) сигналов с 6 анодных плоскостей камеры равна  $\sim 98\%$  за время 25 нс;
- эффективность мажоритарных совпадений (4/6) сигналов с 6 катодных плоскостей камеры равна  $\sim 96\%$  за время 50 нс.

Впервые показана возможность точной регистрации координаты мюона с высокой эффективностью с помощью многослойной катодно-стриповой камеры в магнитном поле величиной 3 Тесла в присутствии большого количества сопутствующих треков и высоких фоновых загрузок. Показана возможность использования многослойной камеры в качестве триггерного детектора для быстрого выделения треков и привязки их к моменту столкновения пучков. Экспериментально исследованы характеристики камеры в условиях, близких к реальным в

**установке CMS:**

- в магнитном поле величиной  $\sim 3$  Тесла,
- в присутствии коррелированного фона (электромагнитного сопровождения от мюонов),
- и некоррелированного фона величиной до 100 кГц на канал регистрации,

камера обеспечивает следующие параметры:

- координатное разрешение камеры  $\sigma \sim 75$  мкм при эффективности реконструкции мюонных треков не менее 92% (координатное разрешение  $\sigma$  для каждой субкамеры не хуже 150 мкм, а трек состоит не менее чем из 4 точек);
- временная привязка событий к моменту столкновения пучков обеспечивается вторым анодным сигналом за время не более 25 нс, а идентификация их как треков обеспечивается мажоритарными схемами совпадений (4/6) для анодных и быстрых катодных сигналов с 6 субкамер за время 50 нс. Эффективность временной привязки событий не хуже 93%.

Определены допустимые режимы работы камеры по газовому усилению:

- для рабочей газовой смеси  $Ar(30\%)+CF_4(10\%)+CO_2(60\%)$  камера обеспечивает требуемые параметры в диапазоне газовых усилений  $G \sim (4 \div 10) \times 10^4$ , что соответствует интервалу анодных напряжений (2,81 ÷ 2,94) кВ.

Полученные результаты исследования прототипов P0-P3 вошли в проект "CMS. The Muon Project", глава 4 - "Endcap chambers- cathode strip chambers".

3. Применен метод компенсации влияния магнитного поля на координатное разрешение камеры путем поворота анодных проволочек на соответствующий угол относительно оси камеры (центрального стрипа). С целью оптимизации угла наклона анодных проволочек была создана программа моделирования координатного разрешения камеры учитывающая величину зазора анод-катод камеры, шаг анодных проволочек и их диаметр, свойства используемой газовой смеси, величину магнитного поля и величину газового усиления. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными измерениями.
4. Впервые показано, что для получения достоверных оценок координатного разрешения камеры и эффективности реконструкции треков мюонов в условиях большого количества сопутствующих треков необходимо использовать метод максимума правдоподобия и метод робастного фитирования.
5. Впервые показана адекватность параметров камеры требованиям эксперимента CMS. На основе проведенных исследований разработана и создана мюонная станция ME1/1.

**Диссертация основывается на следующих опубликованных работах:**

1. К.А.Зубов, В.Ю.Каржавин, С.А.Мовчан и П.В.Моисенз, Математическое обеспечение многопроволочной пропорциональной камеры с катодным считыванием информации, Сообщение ОИЯИ P10-99-118, Дубна, 1999.
2. I.Golutvin, I.Gramenitsky, P.Moissenz, S.Movchan et al., Increasing of muon track reconstruction efficiency in ME1/1 Dubna prototype for the CMS/LHC, JINR Rapid Communications No.1[93]-99, JINR, Dubna, Russia, 1999, pp.48-55.
3. I.Golutvin, Y.Kiriouchine, S.Movchan et al., Robust estimates of track parameters and spatial resolution for CMS muon chambers, Computer Physics Communications vol.126 (2000) pp.72-76.
4. Ершов Ю.В., Глonti Л.Н., Голутвин И.А., ...,Мовчан С.А. и др., Р4-предсерийный прототип КСК ME1/1, Сообщение ОИЯИ E13-2000-26, Дубна, 2000.
5. I.Golutvin, N.V.Gorbunov, V.Yu.Karjavin, V.S.Khabarov, G.V.Mescheriakov, P.V.Moissenz, S.A.Movchan et al., The rate capability of the CSC readout electronics, Particles and Nuclei, Letters, 2001, No.4[107], JINR, Dubna, Russia, 2001, pp.45-53.
6. И.А.Голутвин, И.М.Граменицкий, В.Ю.Каржавин, А.В.Зарубин, П.В.Моисенз, С.А.Мовчан и др., Временное разрешение камер с сегментированным катодом мюонной станции ME1/1 компактного мюонного соленоида и идентификация момента взаимодействия пучков коллайдера, Письма в ЭЧАЯ, 2001, №4[107], стр.54-62.
7. С.А.Мовчан и П.В.Моисенз, Методика вычисления угла наклона анодной проволоки первой мюонной станции (ME1/1) установки «Компактный мюонный соленоид» (CMS), Письма в ЭЧАЯ, 2001, №4[107], стр.82-92.
8. Yu.Erchov, I.Golutvin, N.Gorbunov et al., Cathode strip chamber performance of the CMS ME1/1 muon station, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Advanced Technology @ Particle Physics (ICATPP-7), World Scientific, 2002, pp.347-351.
9. И.А.Голутвин, Ю.Т.Киришин, С.А.Мовчан и др., Робастные оптимальные оценки параметров трек-сегментов в катодно-стриповых камерах эксперимента CMS, ПТЭ, №6, 2002, стр.5-12.

Получено 26 января 2007 г.