

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-96-171

Б-81

На правах рукописи
УДК 539.1.074.2

БОНЮШКИН
Юрий Евгеньевич

ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНЫХ КООРДИНАТНЫХ
ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ

Специальность: 01.04.01 — техника
физического эксперимента, физика приборов,
автоматизация физических исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель :
кандидат физико-математических наук Г. Д. Алексеев

Официальные оппоненты :
доктор физико-математических наук В. П. Кубаровский, ИФВЭ, Протвино
кандидат физико-математических наук А. В. Куликов, ЛЯП ОИЯИ

Ведущее научно-исследовательское учреждение :
Московский инженерно-физический институт (г. Москва)

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1996 г. в
_____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1996 г.

Ученый секретарь специализированного совета
доктор физико-математических наук

Ю. А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Мюонная система играет исключительно важную роль в детектировании наиболее интересных физических процессов на адронном коллайдере LHC: открытие и исследование Хиггсовского бозона, t -кварка, тяжелых векторных бозонов и субструктуры лептонов и кварков. Выбор типа детектора определяет успешное выполнение основных функций мюонной системы: идентификация, триггер и спектрометрия мюонов.

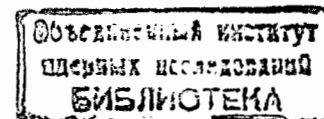
Целью работы являлись методические исследования различных типов газоразрядных детекторов для точного измерения координат заряженных частиц при большой площади детекторов в мюонных системах установок на современных коллайдерах и измерения предельных характеристик этих детекторов.

Были изучены различные аспекты работы следующих типов детекторов:

1. дрейфовых трубок повышенного давления,
2. стримерных дрейфовых трубок с катодом из алюминиевого профиля,
3. пропорциональных камер с катодным считыванием,
4. трубок Иароччи с внешними емкостными электродами.

Научные результаты и новизна. В диссертации получены следующие результаты, выдвигаемые автором для защиты:

1. Впервые предложено использовать дрейфовые трубки повышенного давления как высокоточный координатный детектор мюонной системы, показана принципиальная возможность координатного разрешения лучше 100 мкм при давлении выше 1 атм вначале на малом прототипе на пучке, а затем на полномасштабных прототипах площадью 1 м на 4 м на космических мюонах в большом диапазоне углов падения треков при диаметре трубок около 30 мм.
2. Впервые испытан полномасштабный прототип детектора на дрейфовых трубках с катодом из алюминиевого профиля, работавший в самогасящемся стримерном режиме. Продемонстрировано координатное разрешение около 80 мкм при атмосферном давлении, и предложен быстрый алгоритм определения момента прохождения частицы через детектор с точностью 16 нс при эффективности 94%.
3. На специальной пропорциональной камере с вращающейся анодной рамкой детально изучен эффект магнитного поля, ухудшающего разрешение в пропорциональных камерах с катодным считыванием в торцевых частях установки CMS, и измерен угол компенсации, позволяющий восстановить высокое разрешение. Использована методика офокусированного пучка ультрафиолетового импульсного лазера для создания ионизации в камере.
4. Впервые показана применимость трубок Иароччи со считыванием внешними емкостными электродами для точного измерения координаты. Создана модель, позволившая изучить влияние неоднородности резистивного покрытия, режима газового усиления и геометрических параметров камеры на точность определения



координаты при различных способах вычисления центра распределения заряда на стрипах. Были проведены измерения координатного разрешения в пропорциональном и стримерном режимах с прототипами на рентгеновских γ -квантах, сфокусированном лазерном пучке и пучке высокоэнергичных мюонов, где получено координатное разрешение 80 мкм.

Практическая ценность работы. Исследования, положенные в основу диссертации, нашли свое применение в строящихся установках на LHC.

1. На установке ATLAS на LHC главным типом координатного детектора в мюонной системе являются дрейфовые трубки повышенного давления. При тороидальной конфигурации магнитного поля этот вид детектора является единственно приемлемым с точки зрения импульсного разрешения и стоимости.
2. Стримерные дрейфовые трубки рассматривались как дешевая работоспособная альтернатива дрейфовым трубкам повышенного давления в центральной мюонной системе установки GEM.
3. Пропорциональные камеры с катодным слитыванием приняты в качестве детектора мюонной системы в торцевых частях установки CMS на LHC. Компенсация эффекта магнитного поля поворотом проволок на определенный угол позволяет значительно улучшить координатное разрешение камер и, следовательно, импульсное разрешение мюонной системы.
4. Трубки Иаротчи со слитыванием внешними емкостными электродами могут быть использованы в качестве точного координатного детектора большой площади, так как они обладают хорошим координатным разрешением, надежны, просты в сборке и недороги.

Апробация работы. Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на научных семинарах ЛЯП и SSC, на рабочих совещаниях коллабораций GEM, ATLAS и CMS, а также на международной конференции по проволочным камерам (Вена, 1995).

Публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в одиннадцати работах в течение 1990-1995 гг. /1-11/.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 104 страницы текста, включая 7 таблиц, 73 рисунков и список цитируемой литературы из 102 позиций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены примеры важных физических процессов на адронных коллайдерах, требующих прецизионной мюонной спектрометрии.

Рассмотрено более устройство универсальной установки, способной детектировать эти процессы. Показана важность высокой точности измерения импульса мюона, указаны основные вклады в ошибку измерения сагитты трека заряженной частицы в магнитном поле.

В стандартной модели частицы приобретают массу в результате Хиггсовского механизма спонтанного нарушения симметрии, которая должна проявить себя как новая физика в области энергий порядка 1 ТэВ. Этим объясняется интерес к адронным коллайдерам высоких энергий 14 - 40 ТэВ и светимостей (SSC, LHC). Примеры интересных физических процессов, в которых идентификация и измерение мюонов играет решающую роль: распады Хиггсовского бозона, физика тяжелых кварков, физика тяжелых бозонов, структура лептонов и кварков.

Для детектирования частиц-продуктов взаимодействия спроектированы универсальные установки — GEM, SDC, ATLAS и CMS, — способные точно измерять энергии и импульсы различных типов частиц. Вокруг точки взаимодействия последовательно расположены трековая система, электромагнитный и адронный калориметры и мюонная система, покрывающие полный телесный угол. Для успешного измерения физических процессов мюонная система должна обладать следующими функциональными свойствами: идентификация мюона, геометрическая эффективность, p_t триггер, определение момента взаимодействия, разрешение по поперечному импульсу и высокая грузочная способность в плохо-предсказуемых фоновых условиях.

Для повышения точности измерения импульса мюона необходимо улучшать координатное разрешение мюонных камер и точность взаимной пространственной привязки детекторов в большой системе. Это особенно важно в мюонных системах установок с малым многократным рассеянием — GEM и ATLAS.

Во второй главе дано краткое введение в теорию работы газоразрядных счетчиков: процессы ионизации, дрейфа и диффузии электронов в электрическом и магнитном полях, лавина и режимы газового усиления, развитие электрического сигнала, вопросы выбора газовой смеси и времени жизни детектора.

Заряженная частица оставляет в чувствительном газовом объеме детектора трек ионизации. Среднее энерговыделение в зависимости от заряда частицы, ее скорости $\beta\gamma = PC/M$, а также вещества, в котором происходит энерговыделение, определяется формулой Бете-Блоха. Эта функция имеет минимум при $\beta\gamma \approx 3-3.5$, где $(dE/dx)_{\min} \approx 1-1.5 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{г}$. При энергиях выше 100 ГэВ заметную роль в энерговыделении начинают играть электромагнитные процессы: тормозное излучение и образование пар, что снижает эффективность точного измерения координаты мюонов и усложняет распознавание треков.

В тонких слоях вещества флуктуации энерговыделения относительно среднего значения приблизительно подчиняются распределению Ландау. Длинный хвост в области больших энерговыделений — за счет энергичных δ -электронов, которые являются еще одним источником ошибок измерения координаты. Электроны

первичной ионизации теряют энергию в упругих и неупругих столкновениях, производя вторичные ионные пары. Общее число электронов на 1 см газа — около 150 и зависит от среднего атомного числа смеси.

Электроны ионизации дрейфуют в электрическом поле к анодной проволоке. Скорость дрейфа зависит от произведения силы электрического поля на время между взаимодействиями, в которых электрон эффективно сбрасывает энергию, и, следовательно, учитывает сечения взаимодействия электрона с молекулами газа в зависимости от энергии (кривая Рамзауэра). Диффузия — мера воздействия случайных столкновений с молекулами газа на движение электрона. Она приводит к флуктуации времени дрейфа электрона к анодной проволоке. Поскольку реально на проволоку приходит не один, а десяток электронов практически одновременно, эффект диффузии на разрешение по времени дрейфа меньше диффузии единичного электрона, и, в случае временной привязки по первому электрону, $\sigma_1 = \sqrt{2\sqrt{3}lnl} \cdot \sigma_x$, где $\sigma_x = \sqrt{2D/W}$ — диффузия одного электрона.

В скрещенных электрическом и магнитном полях сила Лоренца заставляет электроны дрейфовать под углом к силовым линиям электрического поля, называемым углом Лоренца и определяемым произведением величины магнитного поля на время между взаимодействиями. Таким образом, угол Лоренца тем больше, чем меньше сечение взаимодействия электрона с молекулами газа.

На расстояниях порядка диаметра проволоки начинается лавинообразное размножение электронов ионизации. Число электронов в лавине, приходящееся на один начальный электрон, есть коэффициент газового усиления. В общем случае он экспоненциально зависит от напряжения на аноде и имеет сильные степенные зависимости от газового зазора и радиуса анодной проволоки. Знание этих зависимостей имеет большое значение для конструкции работоспособной камеры.

В зависимости от газового наполнения поведение детектора различно при увеличении напряжения на аноде, или коэффициента газового усиления. Наличие многоатомных органических газов, поглощающих без переизлучения ультрафиолет, образующийся в лавине, ограничивает распространение разряда по объему детектора и предотвращает пробой.

Большая часть сигнала с детектора в пропорциональном режиме происходит от движения положительных ионов к катоду и определяется зарядом в лавине, геометрией (емкостью) детектора, полем на анодной проволоке и подвижностью ионов. Эти же факторы определяют скорость натекания заряда на аноде и катод. При нормальных условиях, за 1 мкс интегрируется около 50% заряда. Увеличение давления уменьшает скорость движения ионов и поэтому уменьшается амплитуда сигнала и увеличивается временная постоянная сбора заряда.

При выборе газовой смеси для детектора мюонной системы важны следующие характеристики смеси: стабильность работы большого числа камер, высокая скорость дрейфа, малый угол Лоренца, медленное старение детектора, безопасность.

Третья глава посвящена дрейфовым трубкам как прибору для точного измерения координаты по времени дрейфа.

Локальное пространственное разрешение дрейфового детектора определяется процессами в газе: флуктуации энергетических потерь, дельта-электроны, электромагнитное сопровождение, диффузия электронов ионизации во время дрейфа к анодной проволоке. Повышение давления, уменьшая расстояние между кластерами ионизации, приводит к улучшению разрешения во всем диапазоне дрейфовых расстояний. Улучшается эффективность гашения послепулсов в СРС режиме в смесях с органикой, что уменьшает заряд при том же качестве сигнала, — продлевается время жизни детектора.

Для измерения сагитты трека мюонным спектрометром важно обеспечить высокое координатное разрешение на большой площади детекторов, помещенных в магнитное поле. Систематические эффекты, вносящие наиболее ощутимые вклады в разрешение: точность знания функции время-расстояние $r(t_{dr})$, которая зависит от изменений давления, температуры, магнитного поля (необходимо учесть существенные изменения на длине одной трубки); температурные эффекты, приводящие к изменению геометрии камеры; точность позиционирования нитей; точность взаимной привязки камер.

Использование сфокусированного внутри детектора пучка импульсного ультрафиолетового лазера для ионизации газа позволяет моделировать трек заряженной частицы без дельта-электронов [1]. На стенде, созданном в SSC Лаборатории, были проведены измерения $r(t_{dr})$ для нескольких быстрых негорючих газовых смесей на основе Ar, CF₄, CO₂ и C₄H₁₀, изучена стабильность работы детектора на этих смесях и предельное разрешение [2]. Большинство смесей имеет время дрейфа на расстояние 8 мм от проволоки не более 175 нс и пространственное разрешение около 25-30 мкм при атмосферном давлении (рис. 1).

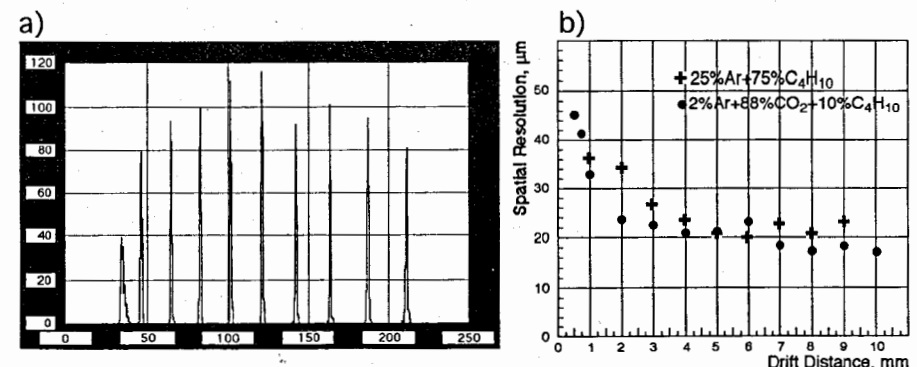


Рис. 1. (а) временной спектр для нескольких положений лазерного пучка относительно анодной проволоки; расстояние между точками — 1 мм; газовая смесь — 25%Ar + 75%i-C4H10; самогасящийся стримерный режим. (б) Пространственное разрешение около 25 мкм было продемонстрировано с ультрафиолетовым лазером на дрейфовой трубке, наполненной газовыми смесями 25%Ar+75%i-C4H10 и 2%Ar+88%CO2+10%i-C4H10.

Группой ОВП ЛЯП ОИЯИ были предложены дрейфовые трубки высокого давления как точный координатный прибор для мюонных систем в установках на адронных коллайдерах [3]. Сборка из 4 трубок диаметром 20 мм была испытана на интенсивном электронном пучке в Протвино в конце 1991 года при давлениях от 1 до 10 атм в СТС режиме на газовой смеси 75%Ar+8%CH₄+17%i-C₄H₁₀; продемонстрировано разрешение лучше 100 мкм на давлениях выше 2 атм. Форма сигнала менялась с увеличением давления: сигнал становился короче, гашение послеимпульсов было более эффективным. Этот и несколько других малых прототипов были испытаны на мюонном пучке в CERN. Были систематически измерены зависимость от давления таких параметров работы детекторов, как максимальное время дрейфа, средний заряд в лавине и координатное разрешение на "быстрой" смеси 70%Ar+30%С₂Н₆ и "медленной" смеси 45%Ar+45%СО₂+10%СН₄. Пространственное разрешение при давлении 3 атм составило 40 мкм для быстрой и 25 мкм для медленной смеси.

В рамках программы по исследованию различных технологий координатных детекторов для мюонной системы GEM в SSC был создан телескоп космических мюонов TTR [4] (рис. 2). Размеры триггерного объема, определяемого сцинтилляционным годоскопом, — 1.2 м в ширину на 5 м в длину на 5 м в высоту, с железным магнитом 1.5 Т толщиной 1 м и трековыми детекторами, что позволило отбирать относительно высокоэнергичные треки в большом диапазоне углов. На TTR было испытано 8 полномасштабных прототипов детекторов различных технологий: как координатных, так и триггерных. Как дрейфовые камеры, так и пропорциональные камеры с катодным считыванием, продемонстрировали разрешение лучше 75 мкм на слой на большой площади.

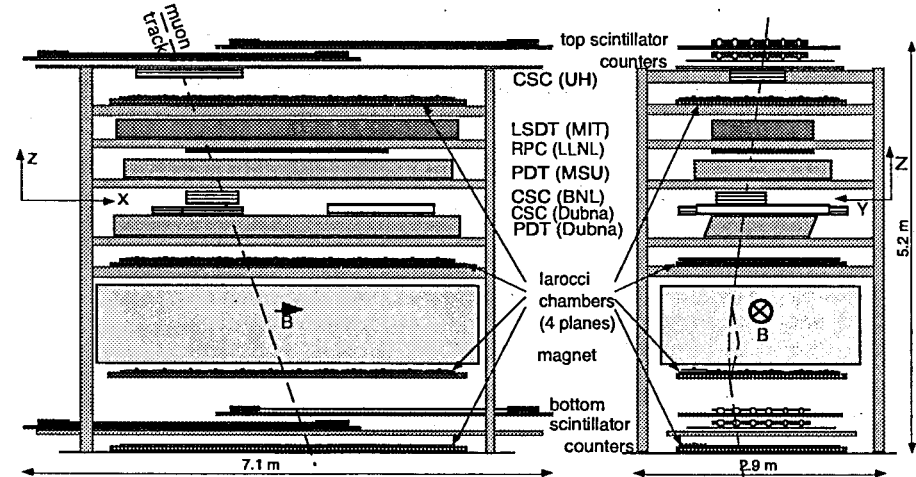


Рис. 2. Конструкция мюонного телескопа TTR; показано расположение прототипов.

В частности было продемонстрировано координатное разрешение около 80 мкм на четырехслойной камере LSDT [5] (Limited Streamer Drift Tubes - стримерные дрейфовые трубки) размером 1 м на 4 м с катодом из алюминиевого профиля, образующим квадратные ячейки с шагом 2.5 см, работавшей в стримерном режиме на смеси 25%Ar+75%i-C₄H₁₀. На данных с этой камеры был проверен алгоритм вычисления момента взаимодействия по временам дрейфа в шести слоях, работавший с эффективностью лучше 95% при частоте соударения банчей на SSC 16 нс (рис. 3).

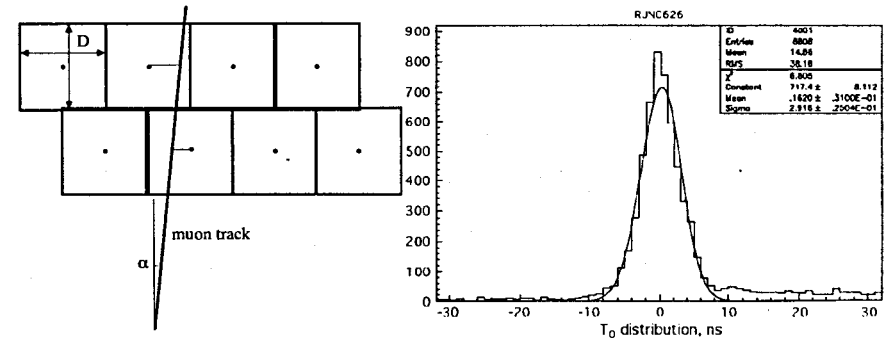


Рис. 3. Для трека, проходящего между проволоками, можно легко вычислить момент времени T_0 , когда он прошел, если известен угол падения α . Пусть существует приближение для функции расстояния время $T(r)$ в виде $T=ar+br^2$, тогда:

$$T_0 = \frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{aC_\alpha}{2} - \frac{b}{4} \left(C_\alpha^2 + \frac{(T_1 - T_2)^2}{(a + bC_\alpha)^2} \right),$$

где T_1 и T_2 — абсолютные времена срабатывания, $C_\alpha = D/2 + \alpha D$ где D — размер трубки. На гистограмме показано экспериментальное распределение T_0 , полученное для каждого трека по 6 возможным комбинациям из 4 слоев трубок с использованием приведенной формулы.

Изучение систематики, дающей вклад в координатное разрешение дрейфовых трубок повышенного давления, привело к созданию на TTR процедуры автокалибровки модуля, позволяющей при помощи данных о треках заряженных частиц

- независимо образом в off-line калибровать относительные задержки в каналах электроники с точностью около 200 пс;
- методом последовательных приближений находить функцию время-расстояние дрейфа $r(t_{dr})$ с точностью около 10 мкм (рис. 4 a,b);
- определять относительные сдвиги и повороты слоев проволок и отдельных проволок с точностью 20 мкм и корректировать координату в off-line;
- на смеси 50%Ar+50%С₂Н₆ продемонстрировать координатное разрешение около 86 мкм при 2.5 атм на модуле размером 1.2 м на 4 м с использованием простой электроники [6] (рис. 4 c), и 50 мкм при 4.8 атмосферах, на модуле размером 0.5 м на 4 м, в широком диапазоне углов падения треков.

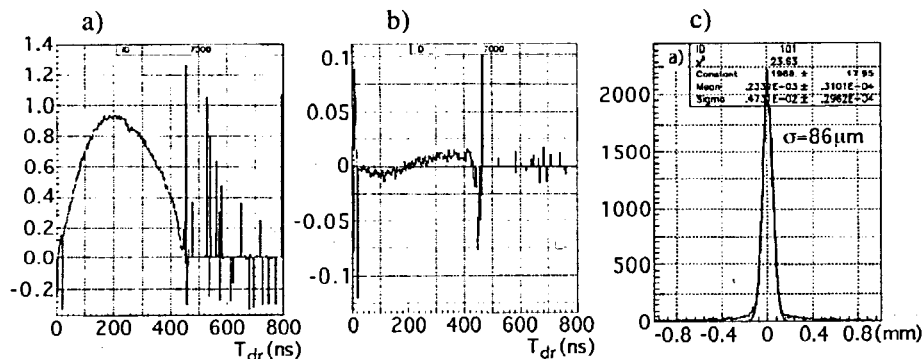


Рис. 4. Быстрая устойчивая сходимость итеративной процедуры определения $R(t)$: в случае прототипа MSU за 5 итераций ошибка в $R(t)$ была уменьшена с около 1 мм (а) до около 10 мкм (б). Графики показывают зависимость средней по всем слоям невязки по радиусу от времени дрейфа на нулевой и пятой итерациях. Координатное разрешение около 86 мкм (с) получено на прототипе MSU на смеси 50%Ar+50% C_2H_6 при давлении 2.5 атм.

Такая процедура имеет большое практическое значение для мюонной системы установки ATLAS, использующей дрейфовые трубки, для корректировки $r(t_{dr})$ в условиях неоднородного магнитного поля, градиентов температуры и давления; а также для подтверждения правильной взаимной привязки слоев детекторов.

Четвертая глава посвящена исследованиям влияния различных эффектов на координатное разрешение пропорциональных камер с катодным считыванием.

Рассмотрены особенности работы пропорциональной камеры со сплошным катодом: структура электрического поля (комбинация однородного поля вблизи катода и коаксиального вблизи анодной проволоки) и влияние геометрических параметров камеры на коэффициент газового усиления. Показаны сильные степенные зависимости коэффициента усиления от толщины газового зазора анод-катод и диаметра проволоки. Приведена эмпирическая формула Гатти для распределения заряда на катоде.

Рассмотрена специфика точного измерения координаты при помощи стриповых камер, показано влияние различных эффектов на пространственное разрешение [7].

Вклад шумов электроники и наводок ставит ограничение на коэффициент газового усиления: $M > 5 \cdot 10^4$. Влияние коррелированного шума можно подавить применением методов определения положения центра по относительным зарядам, например, метода отношения.

Моделирование показало что оптимальная ширина стрипа с точки зрения оптимизации отношения сигнал/шум — около 0.75-0.8 от полной толщины газового зазора, и минимум достаточно широк как в случае большого разброса углов падения треков, когда положения центровидов в различных плоскостях детектора некоррелированы (рис. 5 а), так и в случае параллельного пучка (рис. 5 б).

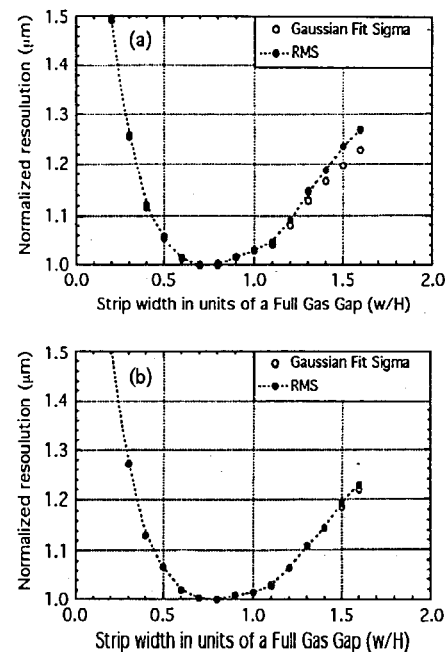


Рис.5. Вклад шумов электроники в пространственное разрешение в зависимости от ширины стрипа. Шум считался некоррелированным и был распределен по Гауссу. RMS распределения отклонений от фита посчитано для отклонений в пределах $\pm 6\sigma$. а) угловой разброс треков велик; б) параллельный пучок.

Вклад калибровки электроники незначителен, если ее точность не хуже 1%. Промоделировано влияние механической точности изготовления детектора (положения анодной проволоки) и флуктуаций центра тяжести лавины при больших газовых усилениях на измерение дифференциальной нелинейности и соответствующий вклад в координатное разрешение. Показано, что смещение центра тяжести лавины дает вклад в разрешение более чем в ~ 10 раз меньше самого смещения (рис. 6 а,б), и что это смещение зависит от метода нахождения центраида

Рассмотрена модель, описывающая вклад в разрешение от наклона трека. Учено влияние неравномерности энерговыделения в кластерах и флуктуации газового усиления. Последующие измерения детектора на трубках Иароччи со стрипами подтвердили результаты моделирования (см. ниже).

Вклад от δ -электронов в разрешение превышает 50 мкм в 5% случаев. Вклад диффузия электронов во время дрейфа к аноду мал.

В магнитном поле появляется систематика, ухудшающая разрешение. В центральной части установки с соленоидальным магнитным полем, где проволоки перпендикулярны силовым линиям, а стрипы параллельны, электроны ионизации

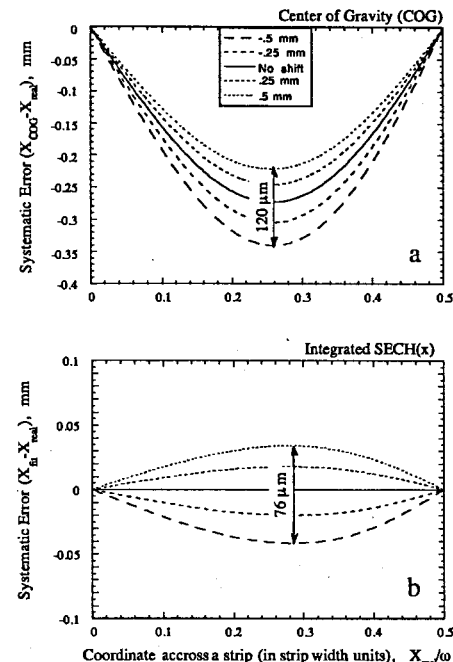


Рис. 6. Чувствительность двух различных методов нахождения центраида к смещению анодной проволоки: (а) метод взвешивания (Center of Gravity); (б) фит изначальным распределением сигнала $\rho(x)$. Ноль координаты соответствует центру стрипа.

"растаскиваются" вдоль проволоки, и разрешение ухудшается из-за флуктуаций кластеров ионизации и газового усиления, как в случае с наклонным треком. Этот эффект можно компенсировать наклоном камеры под углом к треку и подбором газовой смеси с таким же эффективным углом Лоренца [8]. В торцевых частях силовые линии магнитного поля перпендикулярны камерам, что приводит к сдвигу трека вдоль проволоки и измеренная стрипами координата систематически зависит от расстояния дрейфа. Этот эффект компенсируется поворотом анодных проволок по отношению к направлению стрипов на эффективный угол Лоренца.

Предложен новый метод для прямого измерения угла компенсации Лоренц-эффекта в камерах торцевых частей CMS [9]. Была создана специальная камера с вращающейся анодной рамкой (газовый зазор 5 мм, диаметр анодной проволоки 30 мкм, шаг 2.5 мм) при помощи которой эффект был измерен в поле 3.4 Т. Импульсный ультрафиолетовый лазер использован для создания трека ионизации в газовом зазоре камеры. Измерения показали, что вклад в ошибку измерения координаты из-за эффекта магнитного поля минимален при угле компенсации (разворота анодных проволок) 26.6 ± 0.5 градусов в поле 3.4 Тесла (рис. 7). Результаты измерений согласуются с предсказаниями моделирования и аналитических вычислений. Для интенсивного лазерного пучка получено предельное разрешение около 20 мкм (рис. 8). Оно ухудшается до 80-90 мкм в точке посередине между проволоками. Метод может быть использован как экономичный инструмент для дальнейшего изучения поведения пропорциональных камер в магнитном поле, и других специальных эффектов в камерах.

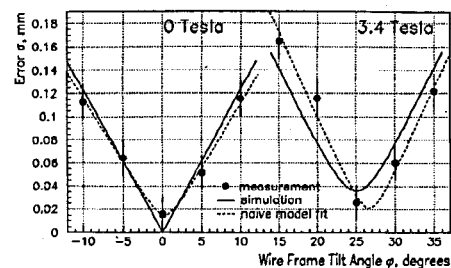


Рис. 7. Вклад в ошибку измерения координаты из-за неоптимального угла поворота анодных проволок в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле 3.4 Т. Компенсация в магнитном поле наблюдается при угле поворота 26.6° . Пунктир - вычисление ошибки по "наивной" модели, сплошная линия - результаты моделирования, основанные на программе MAGBOLTZ (S. F. Biagi).

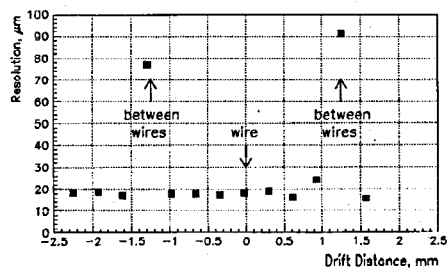


Рис. 8. Предельное пространственное разрешение камеры в зависимости от расстояния дрейфа. Видно существенное ухудшение разрешения в точке посередине между проволоками. Измерения проводились при высоком напряжении 2.9 кВ, заряд на аноде был около 1.2 пКл. Интенсивность лазера была установлена так, что результирующая ионизация была эквивалентна ионизации от б-кванта γ -кванта.

Группой ОВП ЛЯП, накопившей большой опыт работы с трубками Иароччи [1, 7, 10], эти трубки в сочетании с внешними емкостными электродами предлагались как координатный детектор для мюонных систем. Такой детектор не требует

высокой механической точности изготовления, так как ее влияние на разрешение подавлено с фактором 10. Особенностью детектора является резистивный катод. Расчеты показывают, что разрешение детекторов с профильным катодом, работающими в пропорциональном режиме, имеет внутренние ограничения не хуже, чем обычные стриповые камеры при условии, что профиль либо имеет очень низкую резистивность, либо высокорезистивное покрытие с однородностью резистивности лучше 25%.

Были проведены измерения внутреннего разрешения такого типа детектора с рентгеновскими γ -квантами, импульсным ультрафиолетовым лазером и на мюонном пучке для трех типов трубок: катод низкой резистивности без крышки, катод и крышка высокой резистивности, и алюминиевый катод без крышки. Из данных с лазером можно заключить, что в случае равномерной ионизации внутреннее разрешение в пропорциональном режиме — около 15 мкм, в то время как в стримерном режиме — 100 мкм, что, вероятно, определяется пространственными флуктуациями развития стримера при его протяженности. На мюонном пучке с детектором из четырех слоев трубок/стрипов было получено координатное разрешение около 80 мкм (рис. 9), а вычитание вклада шумов электроники приводит к 60 мкм, которые определяются внутренним разрешением, относительными поворотами стрипов и смещением анодных проволок. Измерена зависимость разрешения от угла падения трека (рис. 10), которая хорошо согласуется с результатами моделирования и предыдущих измерений с обычными стриповыми камерами.

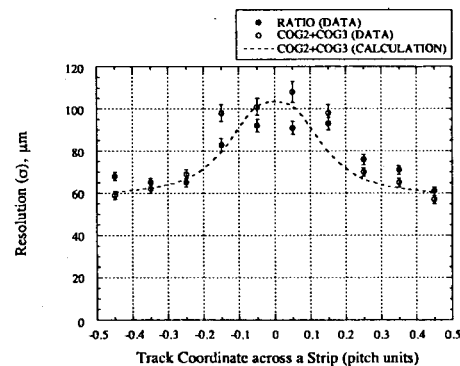


Рис. 9. Зависимость пространственного разрешения от положения на стрипе (мюоны 500 ГэВ). Белые кружки - метод отношений Ratio, черные кружки - метод центра тяжести COG по трем или двум стрипам. Пунктир — это квадратичная сумма вклада шумов электроники и 60 мкм. Ноль координаты соответствует центру стрипа.

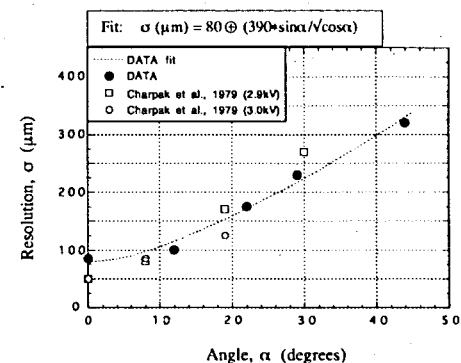


Рис. 10. Зависимость разрешения от угла падения трека по отношению к проволоке.

В мюонной лаборатории TTR в SSC было исследовано 4 полномасштабных прототипа пропорциональных камер с катодным считыванием различной конструкции, и продемонстрировали координатное разрешение около 60 мкм на космических

мюонах. В частности, разрешение около 64 мкм было измерено на трехслойной камере размером 0.5 м на 1 м из трубок Иароччи с высокорезистивным катодом и стрипами с шагом 5 мм [11]. В настоящее время опыт мюонной группы GEM с успехом используется в разработке и строительстве прототипов мюонной системы торцевых частей CMS.

В конце четвертой главы приведен сравнительный анализ дрейфовых трубок повышенного давления и пропорциональных камер с катодным считыванием с точки зрения их применения в мюонных системах установок на современных адронных коллайдерах.

Координатное разрешение. Как для дрейфовых трубок, так и для камер со считыванием емкостными электродами, предельное пространственное разрешение, измеренное при помощи импульсного лазера, примерно одинаково, составляет 20-25 мкм и определяется шумами электроники [1, 2, 7, 9] (рис. 1, 8).

Исследования полномасштабных прототипов показали, что точность около 50 мкм на слой естественна для камер с катодным считыванием и достижима на дрейфовых трубках при давлении около 5 атм, что адекватно требованиям мюонных спектрометров с малым многократным рассеянием — GEM и ATLAS. Автокалибровка позволяет находить зависимость координаты от времени дрейфа в трубках [6] (рис. 4) и дифференциальную нелинейность в стриповых камерах, а также относительные сдвиги и повороты слоев в обоих типах детекторов. Относительные задержки временных каналов и положение отдельных проволок в дрейфовых трубках являются величинами коррелированными, и, следовательно, необходима система независимой калибровки и/или точное позиционирование проволок. В стриповых камерах высокая, лучше 25 мкм, точность нанесения рисунка стрипов естественна.

Другим преимуществом камер с катодным считыванием является возможность устранения (компенсации) эффекта магнитного поля на приборном уровне путем поворота камер в центральной части соленоидального спектрометра или анодных нитей в торцевых частях, как показали измерения, описанные в [9] (рис. 7).

Временная привязка срабатывания в камере к моменту взаимодействия. Привлекательной особенностью пропорциональных камер является совмещение в одном приборе точного измерения координаты и триггерных качеств, включая временную привязку трека в камере к моменту соударения банчей уже на первом уровне триггера, благодаря малому времени дрейфа — около 40 нс.

На экспериментальных данных, полученных в SSC [4] (рис. 2), было показано [5] (рис. 3), что дрейфовые трубки с дрейфовым промежутком около 15 мм также обладают возможностью определения момента соударения банчей с эффективностью около 95%, но в силу большого разброса времен появления сигнала это невозможно сделать быстро. Поэтому трубки требуют дополнительного триггерного прибора, как, например, резистивные плоскопараллельные камеры (Resistive Plate Chambers, RPC, в CMS) или узкозазорные камеры (Thin Gap Chambers, TGC, ATLAS) с временным разрешением порядка нескольких наносекунд и координатной точностью несколько

миллиметров, что необходимо для триггера по поперечному импульсу.

Качество сигнала и сложность электроники. Для получения высокой точности заряд со стрипов должен измеряться с точностью около 1%. Это обуславливает использование низкошумящей электроники с большим динамическим диапазоном и систему прецизионной калибровки. Большое число каналов приводит к высокой стоимости электроники в системе пропорциональных камерах со стрипами. Увеличение шага считывания в стриповых камерах торцевой части CMS до 10 мм приводит к ухудшению точности из-за увеличения шума пропорционально емкости стрипа (300 пФ). Но в конкретном случае CMS это неважно, так как разрешение доминируется многократным рассеянием в железе ядра соленоида.

Преимуществом дрейфовых трубок является больший шаг считывания (30 мм) что означает меньшее число электронных каналов. Электроника для дрейфовых камер идеологически проще, хотя работа в пропорциональном режиме предполагает наличие низкошумящего предусилителя, а из-за большого времени дрейфа необходим глубокий pipeline.

Сложность и надежность камеры. Трубка, как основной конструктивный элемент, не требует высоких допусков на размеры и поэтому недорога. Массив трубок образует жесткую самоподдерживающуюся конструкцию.

Ключевым элементом пропорциональных камер является панель, состоящая из сотового материала, на который наклеены листы фольгированного стеклотекстолита. Высокие требования на плоскостность поверхности катода, около 150 мкм в случае CMS, и необходимость нанесения "рисунка" стрипов приводят к удорожанию этого конструктивного элемента, и, как следствие, всей камеры.

Проволока в трубках заключена в замкнутом объеме, и ее случайный обрыв не приводит к существенным потерям геометрической эффективности системы. Обрыв проволоки в пропорциональной камере может омертвить значительную область.

Газовая система. Преимуществом пропорциональных камер с катодным считыванием является слабая зависимость точности от колебаний состава газовой смеси. В дрейфовых трубках требования к качеству смеси выше, так как она задает функцию время-расстояние. Система дрейфовых трубок имеет больший газовый объем, особенно в случае повышенного давления.

Работа камер в условиях больших загрузок, старение. Фоновые загрузки в мюонной системе оказываются высокими. В торцевых частях CMS, например, частота срабатываний в камерах согласно моделированию составляет около 10 Гц/см² на внешних радиусах (300 - 700 см) и доходит до 1000 Гц/см² на внутреннем радиусе (100 см) первого слоя камер. На 90% это — некоррелированный фон, то есть γ -кванты от захвата нейтронов. Чувствительность детектора к γ -квантам тем больше, чем больше газовый объем, так что трубки находятся в более трудных условиях, чем пропорциональные камеры, где газовый зазор уже. Кроме того, из-за большого шага считывания на проволоке дрейфовой трубки аккумулируется большой заряд, что ускоряет старение детектора.

По этим причинам в торцевых частях установок на адронных коллайдерах использование пропорциональных камер со стриповым считыванием более логично, в то время как в центральной части при относительно небольших нагрузках дрейфовые детекторы представляют работоспособный и более экономичный вариант. Технические предложения показали, что как ATLAS, так и CMS пошли по этому пути.

В заключении кратко сформулированы результаты, положенные в основу диссертации и личный вклад автора в исследования.

- Автором создан первый прототип детектора на дрейфовых трубках высокого давления в стримерном режиме, который был испытан на пучке ускорителя в Протвино и подтвердил принципиальную возможность высокого (лучше 100 мкм для быстрой газовой смеси) разрешения при работе в стримерном режиме при давлении 2 атм и выше. Впоследствии при испытании этого прототипа на пучке в CERN было получено разрешение около 30-40 мкм при давлении 3-4 атм на медленной и быстрой смесях.

- При ведущем участии автора была создана установка для исследования полномасштабных прототипов детекторов различных технологий, предложенных для мюонной системы GEM, на космических мюонах — Texas Test Rig (TTR) в лаборатории SSC (Dallas, Texas). На установке было исследовано 8 полномасштабных прототипов детекторов пяти различных технологий.

В частности, было продемонстрировано координатное разрешение около 80 мкм на четырехслойной камере размером 1 м на 4 м с катодом из алюминиевого профиля, образующим квадратные ячейки с шагом 2.5 см, работавшей в стримерном режиме на смеси 25%Ar+75%i-C₄H₁₀. На данных с этой камеры был проверен алгоритм вычисления момента взаимодействия по временам дрейфа в шести слоях, работавший с эффективностью лучше 95% при частоте соударения банчей 16 нс.

Разрешение около 50 мкм было измерено на стриповой камере с трубками Иароччи размером 1 м на 0.5 м.

На основании результатов, полученных на TTR, коллаборация выбрала пропорциональные камеры с катодным считыванием как детектор мюонной системы установки GEM.

В непосредственные обязанности автора входило:

1. проектирование, моделирование и оптимизация параметров установки TTR;
2. разработка, наладка и эксплуатация газовой системы TTR; газовая система обеспечила возможность одновременного тестирования всех прототипов;
3. сборка, тестирование и калибровка сцинтилляционного гетоскопа; результирующая точность временной привязки на TTR была около 300 пс;
4. сборка реперной трековой системы на пластиковых стримерных трубках, измерение ее эффективности и наладка системы приема информации;
5. координация работы нескольких групп во время тестов прототипов на TTR.

- Автором на TTR создан измерительный стенд для исследования малых прототипов различных типов детекторов при помощи источников и сфокусированного пучка ультрафиолетового лазера.

На этом стенде автором получены рекордные результаты для предельного

пространственного разрешения дрейфовой трубки в стримерном режиме на нескольких газовых смесях при атмосферном давлении — около 25 мкм на сфокусированном лазерном пучке. Были исследованы временные свойства быстрых смесей с небольшим, менее 10%, содержанием органической добавки.

Были также проведены предварительные исследования газовых смесей для пропорциональных камер с катодным считыванием для установки GEM с точки зрения стабильной работы, оптимизации пространственного разрешения в магнитном поле и скорости дрейфа. Смесь 45%Ar+45%CF₄+10%i-C₄H₁₀ была рекомендована для мюонной системы.

- В ходе обработки данных измерений прототипов на TTR автор принял участие в создании процедуры автокалибровки модуля дрейфовых трубок. Эта программная процедура, используя треки заряженных частиц, позволяет значительно уменьшить вклад в координатное разрешение следующих систематических эффектов:

1. ошибка в определении относительных временных задержек в различных каналах; результирующая точность определения этих задержек была 0.2 нс (вклад в разрешение около 10 мкм);
2. определение функции время-расстояние с точностью лучше 10 мкм;
3. поправка на относительные повороты слоев и отдельных проволок;
4. поправка на сдвиги слоев и отдельных проволок.

В результате на прототипе площадью 1.2 м на 4 м, изготовленном в университете штата Мичиган и оснащенном простой электроникой (дискриминатор-ВЦП, 96 каналов), автором получено разрешение около 85 мкм при давлении 2.5 атм на смеси 50%Ar+50%C₂H₆.

- Автором предложен метод измерения компенсации эффекта магнитного поля в пропорциональных камерах с катодным считыванием для торцевых частей установки CMS. Компенсация достигается поворотом анодной рамки на определенный угол, прямое измерение которого проводилось впервые. Автор принял ведущее участие в создании специальной камеры с вращающейся анодной рамкой и измерениях с ней. Для создания ионизации, подобной треку заряженной частицы, использовался импульсный ультрафиолетовый лазер. Камера была установлена внутри сверхпроводящего магнита M1 на установке RD5 в CERN, где был измерен угол компенсации 26.6 градусов в магнитном поле 3.4 Тесла.

- Было проведено моделирование сигнала, наведенного на стрипах в пропорциональных камерах с катодным считыванием и в камерах на трубках Иароччи, для оптимизации геометрических параметров камер с точки зрения шумов, режима работы по газовой усилению, дифференциальности и пространственного разрешения. Измерения показали правильность результатов моделирования.

- При ведущем участии автора создан прототип и исследованы возможности использования трубок Иароччи с внешними емкостными электродами для точного измерения координаты. Было измерено координатное разрешение прибора такого типа при помощи рентгеновских γ -квантов, лазера и на пучке мюонов энергии 0.5 ТэВ, где было продемонстрировано разрешение около 80 мкм при работе в пропорциональном режиме. Эти исследования доказали применимость этого недорогого и надежного типа детектора для точного измерения координаты.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Yu. Bonushkin, N. Khovansky, A. Korytov, V. Malyshev, Yu. Sedykh, V. Tokmenin, (JINR, Dubna); H. W. Kendall, L. S. Osborne, G. D. Ross, A. Sodickson and R. Verdier, (MIT); "Studies of Drift And Strip Readouts for a Large Scale Muon System", NIM A315 (1992) 55-64.
2. Yu. Bonushkin, C. Milner, J. Pryor, "Study of Gas Mixtures for Large Muon Detectors", GEM TN-94-606.
3. Г. Д. Алексеев, С. А. Баранов, Ю. Е. Бонюшкин, Г. А. Шелков, Б. Фиаловски, Г. В. Карпенко, П. П. Хованский, З. В. Крумпштейн, В. Л. Мальпнев, Ю. В. Сельх, В. В. Токменин, "Изучение дрейфовых трубок повышенного давления в качестве точного детектора для мюонных систем", Краткие сообщения ОИЯИ No.5[56]-92, Август 1992.
4. L. Barabash, Yu. Bonushkin, M. Botlo, I. Chow, V. Glebov, A. Gonzalez, R. Guthrie, M. Jagielsky, K. McFarlane, C. Milner, G. Mitselmakher, A. Morelos, P. Murat, U. Nixdorf, R. Pierce, C. Price, O. Prokofiev, T. Reagan, A. Romero, V. Sarantsev, F. Stocker, V. Tchistilin, A. Vanyashin, L. Villaseñor, H. Villegas-Brcna, R. Wolley, G. Yost, V. Zhukov, E. Zimmer- Nixdorf, (SSC); B. Mayes, D. Parks, J. Pyrlík, R. Weinstein, (Univ. of Houston); "Texas Test Rig Laboratory - A Facility for Chamber Studies", GEM TN-94-610
5. H. W. Kendall, J. Kelsey, A. Korytov, D. McCurley, L. S. Osborne, L. Rosenson, G. D. Ross, F. E. Taylor, R. Verdier, B. Wadsworth, (MIT); L. S. Barabash, Yu. Bonushkin, V. Glebov, G. Mitselmakher, P. Murat, L. Villaseñor, G. Yost, (SSC); "Tests of A Muon Chamber Prototype Based on Limited Streamer Drift Tubes", NIM A 343 (1994) p. 447
6. GEM Muon Group, "The RDT-RPC Technology Option for GEM", GEM TN-93-288.
7. N. Khovansky, V. Malyshev, V. Tokmenin, Yu. Sedykh (JINR, Dubna, Russia); A. Korytov, L. S. Osborne, G. D. Ross, R. Verdier (MIT, Cambridge, MA, USA); Yu. Bonushkin, G. Mitselmakher (SSC, Dallas, TX, USA); "Spatial Resolution of Profile-based Detectors with External Pick-up Strips", NIM A351 (1994) 317.
8. Yu. Bonushkin, I. Golutvin, O. Prokofiev, "Choosing A Gas Mixture with 12 Degree Lorentz Angle for The New Layout of The GEM Muon Barrel", GEM TN-93-500, Oct.1993.
9. Yu. Bonushkin, D. Chrisman, J. Hauscr, D. Joyce, Th. Müller, (UCLA); G. Mitselmakher, O. Prokofiev, (Fermilab); A. Gordcev, V. Gratchev, D. Stephani, V. Tcherniatine, (BNL); J. Shank, G. Varner, S. Whitaker, (Boston Univ.); "A UV Laser Technique for The Lorentz Effect Compensation Studies in End Cap CSC's", NIM A367(1995)311; доложено на Венской Конференции по Проволочным Камерам, Февраль 1995.
10. Yu. Ye. Bonushkin, A. V. Korytov, V. L. Malyshev and S. Nova, "Spatial Resolution of Plastic Streamer Tubes with Wide Strip Readout", NIM A300 (1991) 268.
11. K. Lau, B. Mayes, J. Pyrlík and R. Weinstein (Univ. Houston) Yu. Bonushkin, A. Gonzalez, L. Villascenor and G. Yost (SSCL), "TTR Test Results of a UH CSC Prototype" , GEM TN-93-392.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 мая 1996 года.