

92707



ЦБ ОИЯИ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-2010-128

На правах рукописи
УДК 539.107.4

Ж-82

КРИВШИЧ
Анатолий Григорьевич

РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность: 01.04.01 — приборы и методы
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2010

344

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий Учреждения Российской Академии наук Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова.

Официальные оппоненты: доктор физико - математических наук, профессор И.А.Голутвин, ОИЯИ, Дубна

доктор физико - математических наук, профессор А.М.Зайцев, ИФВЭ, Протвино

доктор физико - математических наук, Г.В.Федотович ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва

Защита состоится " _____ " _____ 2011г. в _____ часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 720.001.02 при Объединенном институте ядерных исследований 141980 Дубна Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:
кандидат физико-математических наук



В.А.Арефьев

Введение.

Экспериментальное исследование сложных физических процессов и явлений в области физики высоких энергий подразумевает создание сложной и, как правило, всегда дорогостоящей экспериментальной установки, оптимально сочетающей в себе различные типы детекторов частиц. Основная проблема, которая в этом случае должна быть решена, заключается в правильном выборе методики ядерно-физического эксперимента. Базовым компонентом подобных экспериментальных установок являются трековые системы, созданные на базе газоразрядных детекторов частиц с различными методами съема информации. При этом, как правило, для получения физически красивых экспериментальных результатов требуется:

во-первых, детально проанализировать и минимизировать влияние комплекса зачастую взаимно противоречивых факторов влияющих на работу этих детекторов, с целью реализации их предельно достижимых параметров;

во-вторых, исследовать и оптимизировать алгоритмы их взаимодействия с другими детекторами, входящими в состав экспериментальных установок.

Основная цель работы

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы на примере нескольких весьма уникальных и совершенно различных по идеологии физических экспериментов продемонстрировать способы (или, можно сказать, стратегию) создания и оптимизации сложных экспериментальных установок основным (или существенным) компонентом которых являются трековые газонаполненные детекторы частиц. Уверенность в том, что эта цель может быть достигнута, базируется на многолетнем опыте успешной работы автора и его коллег по созданию трековых систем для различных экспериментов. Это – эксперименты E-715, E-761 и E-781 на гиперонных пучках в Лаборатории им.Э.Ферми (США); эксперименты по изучению каналирования протонов изогнутыми монокристаллами в ЛИЯФ РАН; эксперимент L3 в ЦЕРНе (Швейцария); эксперимент HERMES в DESY (Германия); эксперименты CMS, ATLAS и LHCb в ЦЕРНе (Швейцария) и т.д.. Речь идет о таких детекторах частиц, как детекторы переходного излучения различных модификаций; пропорциональные камеры с анодным и катодным методами съема информации; дрейфовые камеры со съемом информации по времени дрейфа и методом деления зарядов.

Актуальность темы

Все вышеупомянутые детекторы являются одними из основных трековых приборов в современной физике высоких энергий. В будущем, несмотря на появление нового поколения полупроводниковых и газовых микростриповых детекторов, газоразрядные детекторы будут продолжать играть ключевую

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

роль в современных экспериментальных установках на ускорителях как со встречными пучками, так и с фиксированными мишенями.

Для того, чтобы информация о вторичных частицах была максимально детальной, создаются спектрометры, состоящие из различного типа детекторов, каждый из которых использует определённую технологию и решает свои специфические задачи. Поэтому чрезвычайно важным и актуальным представляется создание газоразрядных трековых детекторов, которые позволяют реализовать следующие требования.

Во-первых, образование и последующий распад нестабильных частиц (например, гиперонов, τ – лептонов, c и b – мезонов) приводит к появлению вторичных вершин, для реконструкции которых необходимо высокое пространственное и двухчастичное разрешения детектора в широком диапазоне углов вылета продуктов распада. Детектирование продуктов распада требует создания систем идентификации частиц в условиях, когда традиционные методы становятся мало эффективными.

Во-вторых, при высоких энергиях частицы мало отклоняются в ограниченном объёме магнитного поля экспериментальной установки. Поэтому для точного определения импульса регистрируемых частиц и знака заряда необходимо обеспечить многократное измерение координат вдоль трека частицы с высокой точностью. Причём, учитывая высокую светимость современных коллайдеров ($10^{31} \div 10^{34}$ см⁻¹ сек⁻¹), регистрация частиц должна осуществляться в условиях высокой загрузки (в том числе и фоновой), что одновременно налагает серьёзные требования на временное разрешение детектора.

В-третьих, для работы детектора в экспериментальной физической установке в течение нескольких лет без доступа персонала требуются высокая надёжность и радиационная стойкость прибора в условиях длительного и интенсивного облучения.

Научная новизна работы

Разработаны и созданы сложные экспериментальные установки, одними из ключевых элементов которых были газонаполненные детекторы частиц, отличающиеся комплексом высоких рабочих характеристик, позволяющие эффективно решать перечисленные выше проблемы и получать великолепные физические результаты. В частности:

- Создание детектора переходного излучения, работающего в реальном физическом эксперименте, создало принципиальную возможность для проведения в 1983-1998 годах серии успешных экспериментов на гиперонных пучках (E-715; E-761; E-781; Fermilab, USA) с энергией от 250 ГэВ до 600 ГэВ, в которых была получена целая серия уникальных физических результатов (Глава 1).

- Использование трековых систем, одна из которых имела предельно высокое пространственное разрешение ($\sigma \leq 60 \mu\text{m}$) позволило обнаружить эффект

каналирования протонов с энергией 1 ГэВ и эффект их фокусировки изогнутыми монокристаллами (Глава 2).

- Созданный в ПИЯФ торцевой координатный детектор FTS для экспериментальной установки L3, с помощью которой на ускорителе LEP в ЦЕРНе изучались уникальные физические процессы рождающиеся в e^+e^- столкновениях при энергиях $5 \div 200$ ГэВ. Детектор участвовал в наборе статистики и успешно использовался в анализе данных на протяжении всего десятилетнего периода работы установки L3. Разработан и применен алгоритм оптимизации всех рабочих параметров дрейфовых камер в условиях внешних ограничений. Разработан метод электростатической защиты электрических полей в дрейфовых камерах от внешних разрушающих воздействий (Глава 3).

- Исследование импульсного и углового разрешения «коротких» треков с помощью спектрометра на базе пропорциональных камер, размещенного внутри магнита установки HERMES (DESY), дало возможность анализировать события с рождением Λ^0 - гиперонов (Глава 4).

- Значительный объем диссертации посвящен результатам изучения физики газового разряда в различных типах детекторов частиц, работающих в интенсивных радиационных полях излучений (Глава 5).

Показано, что метод ядерных реакций является очень эффективным при исследовании механизмов старения детекторов. Он позволил впервые в мировой практике получать количественную информацию о поверхностном и глубинном распределении легких элементов, входящих в состав плазмо-химических радикалов, которые образовались в газовых лавинах, и «пришли» на электроды детекторов частиц.

Проведен широкий комплекс исследований по изучению физических механизмов развития старения газоразрядных детекторов частиц в интенсивных полях излучений. Обнаружен принципиально новый тип старения, который был нами назван - эффект распухания анодных проволочек. Показана ключевая роль кислорода в развитии распухания проволочек. Предложена физическая модель развития явления, в основе которого лежат плазмо-химические процессы образования вольфрамо-кислородных соединений. Показано, что в ряде случаев процессы, приводящие к распуханию проволочек, могут идти столь интенсивно, что вольфрамо-кислородные соединения просто «выбрасываются» изнутри проволочки на ее поверхность и распространяются далеко за пределы зоны облучения.

Результатом комплексного исследования старения прототипов мюонных пропорциональных камер для проекта CMS (ЦЕРН) была выработка таких решений, реализация которых позволила гарантировать надежную работу гигантского мюонного спектрометра в течении не менее 30 лет в условиях максимальной светимости LHC. Показано, что рекомендованная к работе газовая смесь обладает уникальными свойствами: позволяет накапливать экстремаль-

но высокие дозы облучения (13 Кулон/см) и полностью блокирует предельно негативное влияние кремнийорганических соединений на работу камер.

Научная и практическая ценность работы.

Практически все, полученные в настоящей работе результаты, имеют несомненную научную и практическую ценность. В частности, был сформулирован (и реализован в ряде уникальных физических экспериментов) общий подход к созданию координатных детекторов для физических экспериментов. В основе этого лежит комплексный анализ факторов, определяющих основные параметры детекторов, и реализация на основе результатов этого анализа предельно достижимых параметров детекторов.

В настоящей работе обсуждаются результаты исследований свойств детекторов переходного излучения и анализируются особенности их применения в серии ядерно-физических экспериментов, позволивших получить уникальные физические результаты. Исследованы и оптимизированы алгоритмы их взаимодействия с другими детекторами, входящими в состав экспериментальных установок.

Демонстрируется сколь широким и разнообразным может быть диапазон ядерных реакций, которые могут быть исследованы на экспериментальной установке, в основу которой положен комплексный и взаимосогласованный набор методов детектирования и идентификации частиц.

Полученные результаты исследований позволили разработать методику исследования и оптимизации физических процессов, протекающих в детекторах частиц, работающих в интенсивных полях излучений.

Проведенные исследования и разработки создали основу для создания в ПИЯФ широкого спектра экспериментальных установок на базе детекторов переходного излучения, пропорциональных и дрейфовых камер с различными типами съема информации (поканальный съем; метод деления заряда; метод измерения времени дрейфа; съем информации на линию задержки; катодный съем информации и т.д.). Эти детекторы надежно работали (и продолжают работать) практически во всех ядерно-физических экспериментах, проводимых ПИЯФ в области физики высоких энергий, как в России, так и в международных научных центрах.

Апробация работы

Материалы, изложенные в настоящей диссертации, докладывались на различных конференциях и совещаниях.

1. Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, 22-27 Feb 2007.
2. Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, 22-27 Feb 2004.
3. 8th International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR02), Novosibirsk, Russia, 28 Feb - 6 Mar 2002.
4. Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, 19-23 Feb 2001.

5. International Workshop on Aging Phenomena in Gaseous Detectors, Hamburg, Germany, 2-5 Oct 2001.

6. International Conference of High-Energy Physics (ICHEP-98), Vancouver, British Columbia, July 23-30, 1998.

7. Symposium on Particle Identification at High Luminosity Hadron Colliders, FNAL, Batavia, Illinois, April 5-7, 1989.

8. Международном совещании по пропорциональным и дрейфовым камерам, Дубна, 1988г.

9. 56(LVI) Международная конференция "ЯДРО-2006" по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра" Россия, Саров, 4-8 сентября 2006 г.

а также публиковались в журналах:

Nuclear Instruments and Methods
Nuclear Physics
Physical Review Letters
Physics Letters

Письма в ЖЭТФ
Вопросы атомной науки и техники
Известия РАН

Личный вклад автора в полученные результаты.

Все приведенные в диссертации работы были выполнены А.Г.Крившичем либо непосредственно под его научным руководством, либо при его самом активном участии (руководство рядом ключевых направлений).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов, которые выносятся на защиту. Общий объем диссертации – 278 страница. В ней содержится 174 рисунков и 13 таблиц и список статей автора, на которых основана диссертация, включающий 42 наименования. Список ссылок на работы других авторов содержит 98 наименований.

Краткое содержание диссертаций

Введение содержит формулировку основной цели работы и проблем, возникающих при её реализации, а также включает в себя краткое описание содержания всех глав представленной работы.

Глава 1. Применение детекторов переходного излучения в экспериментах на гиперонных пучках Лаборатории им.Энрико Ферми (США).

Исторически так сложилось, что в начале 80-х годов экспериментальное исследование свойств гиперонов получило мощный толчок в связи с созданием интенсивных пучков гиперонов на протонных ускорителях Европейского центра ядерных исследований (далее - ЦЕРН) и американской Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми (далее - ФНАЛ). В частности,

во ФНАЛ был запущен первый в мире ускоритель протонов высокой энергии (400 ГэВ) на сверхпроводящих элементах. Рост энергии протонов привел как к существенному увеличению выхода гиперонов, рождающихся при взаимодействии протонов с ядрами мишени, так и к значительному Лоренцевскому увеличению наблюдаемого времени жизни гиперонов. Это открывало новые возможности в изучении гиперонов и продуктов их распада.

Однако для практической реализации этих возможностей необходимо было применить в методике ядерно-физического эксперимента новый класс детекторов, позволяющих идентифицировать частицы в области высоких энергий, где традиционные методы (черенковские счётчики, детекторы ионизационных потерь) становятся менее эффективными. Такими приборами могли бы стать детекторы переходного излучения (далее – ДПИ), которые в начале 80-х годов находились еще на стадии лабораторных исследований. Работы, выполненные в МИФИ под руководством проф. Б.А.Долгошеина, предложившем метод регистрации "ионизационных кластеров", открыли возможность практического использования ДПИ в методике ядерно-физического эксперимента. Проведенный нами анализ проблемы позволил провести предварительные оценки, необходимые для создания и оптимизации ДПИ. В итоге, созданные в ПИЯФ детекторы переходного излучения позволили предложить и успешно провести во ФНАЛ серию успешных экспериментов по изучению свойств гиперонов. Существенно отметить, что в этих экспериментах детекторы переходного излучения, являясь одним из ключевых элементов экспериментальных установок, решали совершенно различные физические задачи.

1.1. Эксперимент E715. Прецизионное измерение β -распада поляризованных Σ^- -гиперонов.

Началом сотрудничества ПИЯФ-ФНАЛ стало предложение ПИЯФ о постановке эксперимента по изучению β -распада поляризованных Σ^- -гиперонов. Эксперимент (E-715) был принят и успешно завершен в течение 1981-1986гг. Детальное описание ДПИ приводится в [1-3]. Существовавшие тогда экспериментальные данные по асимметрии распада Σ^- -гиперонов находились в резком противоречии с предсказаниями модели Кабиббо, тогда как β -распад других членов барионного октета хорошо описывались этой моделью.

Для распада $\Sigma^- \rightarrow n e^- \bar{\nu}$ модель предсказывает следующее отношение аксиально-векторного форм фактора к векторному: $g_1/f_1 = -0.28 \pm 0.02$, что соответствует большой отрицательной электронной асимметрии $\alpha_e \approx -0.51 \pm 0.04$. Абсолютная величина этого отношения была определена в ряде экспериментов с неполяризованными Σ^- -гиперонами с суммарной статистикой около 10000 событий: $|g_1/f_1| = 0.36 \pm 0.04$. Это значение удовлетворительно согласуется с предсказаниями теории Кабиббо. Для определения знака отношения g_1/f_1 было выполнено четыре эксперимента по измерению асимметрии вылета

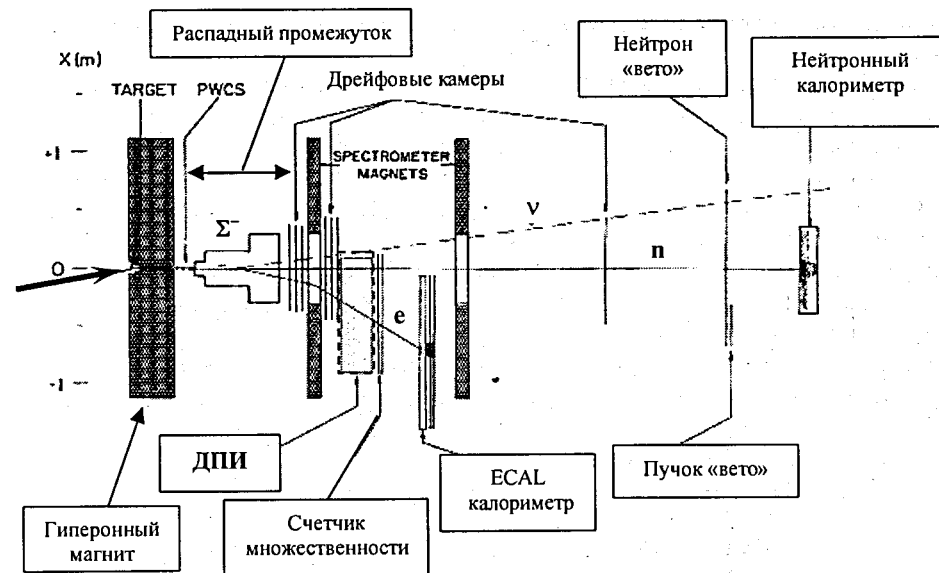


Рис.1. Экспериментальная установка по исследованию β распада Σ^- гиперонов.

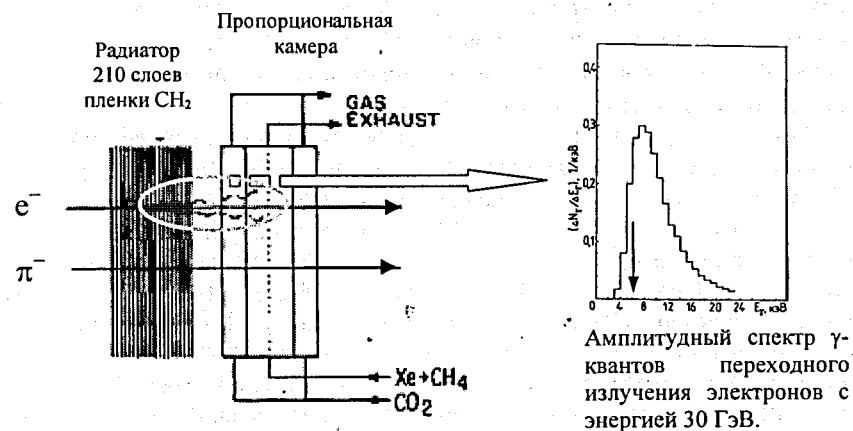


Рис.2. Модуль ДПИ

электронов в распаде поляризованного Σ^- -гиперона. Величина электронной асимметрии усредненная по всем четырем экспериментам составила ($\alpha_e = +0.26 \pm 0.19$), что резко противоречит предсказаниям теории Кабиббо, а знак асимметрии оказался противоположным ожидаемому. Существенно отметить, что суммарная статистика в этих экспериментах составляла 352 события,

что не давало возможности надежно контролировать величину систематических ошибок.

Большой поток гиперонов в пучках ФНАЛ давал нам возможность изучать β -распад гиперонов на статистическом уровне значительно превышающим всю статистику, полученную во всех предыдущих экспериментах.

Основной проблемой в этом эксперименте было выделение исследуемой реакции $\Sigma^- \rightarrow pe^- \nu$ на фоне в 1000 раз более интенсивной реакции $\Sigma^- \rightarrow p\pi^-$. Различить эти реакции, опираясь только на кинематические критерии, было невозможно. Поэтому необходимо было разработать систему идентификации частиц, способную эффективно выделять электроны на большом фоне π^- -мезонов. Для решения этой проблемы группа ПИЯФ предложила использовать детектор переходного излучения, который должен был быть чувствительным к электронам и мало чувствительным к π^- -мезонам. Это предложение не было тривиальным, поскольку до этого такие детекторы практически не использовались в подобных экспериментах.

В работе приводится описание экспериментальной установки (Рис.1). Пучок протонов с энергией 400 ГэВ из Тэватрона направлялся на медную мишень, помещенную в начале гиперонного канала. Магнит М1 отбирал вторичные частицы с импульсом 250 ГэВ/с, образовавшиеся в мишени в телесном угле $\Delta\Omega = 1$ мкрд и с импульсным разбросом $\pm 7\%$. Энергия детектируемых электронов (и π^- -мезонов) была в диапазоне 9-95 ГэВ. Этот диапазон энергий является оптимальным для использования ДПИ. Σ^- -гипероны составляли только $\sim 10\%$ частиц в пучке. Доминирующими же частицами были π^- -мезоны, и их интенсивность составляла $\sim 2 \times 10^5$ 1/с.

Детектор переходного излучения (ДПИ) располагался между магнитным спектрометром и счётчиками SM1 + SM4, предназначенными для определения числа заряженных частиц, прошедших через детектор. ДПИ имел полную длину по пучку 360 см и состоял из 12 одинаковых модулей, каждый из которых имел пропорциональную камеру и радиатор (схематически отдельный модуль показан на Рис.2). Чувствительная область ДПИ была $1,0 \times 0,6$ метра. Полное количество ДПИ вещества на пучке составляло 0,1 радиационной длины и 0,06 ядерной длины. Каждый радиатор состоял из 220 слоев полипропилена толщиной 17 мкм разделенных воздушным зазором 1 мм. Анод каждой пропорциональной камеры состоял из 512 анодных проволочек толщиной 25 мкм (золоченный вольфрам) с шагом 2 мм. Анод располагался симметрично между двумя катодами из алюминизированного майлара. Расстояние между анодом и каждым катодом — 8 мм. Рабочая газовая смесь — 70% Xe + 30% CH₄. При рабочем напряжении 4,6 кВ максимальное время дрейфа электронов составляло 330 нс.

Электромагнитный калориметр LG состоял из 72 блоков свинцового стекла SF5, собранных в 4 слоя общей толщиной 26 радиационных длин, в

нейтронном калориметре NC измерялась энергия и координата нейтрона из распадов $\Sigma^- \rightarrow pe^- \nu$, и $\Sigma^- \rightarrow p\pi^-$.

В эксперименте необходимо было обеспечить высокую степень режекции π^- -мезонов (на уровне $R_\pi \approx 10^5$). Получить столь высокий коэффициент режекции π^- -мезонов при $\epsilon_e \geq 99\%$, используя только ДПИ, очень трудно. Поэтому было решено использовать комбинацию: ДПИ + электромагнитный калориметр (ЭМК) на основе блоков из свинцового стекла. При этом требования к ЭМК были довольно скромными ($R_\pi \sim 10^2$, $\epsilon_e = 96\%$). Возможность использования ДПИ в комбинации с ЭМК — одно из положительных качеств этого детектора.

Поскольку в эксперименте речь шла о прецизионном (с точностью в 1%) измерении электронной асимметрии, то основным требованием к создаваемому детектору была высокая эффективность регистрации электронов ($\epsilon_e \geq 99\%$). В последнем случае вариации неэффективности $(1 - \epsilon_e)$ регистрации электронов по площади детектора на уровне $\Delta(1 - \epsilon_e)/(1 - \epsilon_e) \leq 20\%$ не могли бы привести к заметной ложной асимметрии.

Для того, чтобы одновременно обеспечить высокую эффективность регистрации электронов ($\epsilon_e \geq 99\%$) и необходимую режекцию π^- -мезонов ($R_\pi \geq 10^3$), основное внимание при разработке и конструировании пропорциональных камер ДПИ уделялось получению высокой однородности коэффициента газового усиления (КГУ) по всей площади камеры.

Практическая реализация результатов расчётов ДПИ предъявила жёсткие требования к конструкции и работе пропорциональных камер.

1. Камеры не должны иметь "мёртвой" газовой зоны между входным майларовым окном и катодом.

2. Высокая однородность коэффициента газового усиления (КГУ) по площади камеры, максимальные флуктуации которого не должны были превышать $|\Delta M/M| \leq 15\%$.

Были выделены три основные группы факторов, вызывающие в ДПИ флуктуации КГУ по площади камеры: «гидростатическая», конструкционная и гальваническое объединение проволочек в группы. Детальный анализ выше указанных факторов, их взаимосвязь между собой, характерные особенности и масштаб влияния позволил разработать методы минимизации их влияния на флуктуации коэффициента газового усиления.

Особое внимание было уделено решению проблемы, которую мы условно назвали «гидростатической», для решения которой нами был предложен и реализован метод компенсации [1], который впоследствии нашел практическое применение во многих подобных экспериментах с применением ДПИ. Идея метода заключалась в том, что в конструкцию камеры с плёночными ка-

тодами вводятся два симметрично расположенных буферных слоя газа между катодами и атмосферным воздухом (Рис.2). Эти буферные объемы наполняются газом с молекулярным весом равным молекулярному весу рабочей газовой смеси и одновременно имеющим малое сечение поглощения квантов переходного излучения (близким к соответствующему коэффициенту для воздуха). Принципиальным и наиболее привлекательным моментом в этом методе является то, что не надо знать закон распределения прогиба катода по высоте камеры, вызванного рабочим газом камеры. Дело в том, что практически по такому же закону, но в противофазе действует на катод газ буферного объема, что в основном и обеспечивает пространственную стабилизацию катода. В качестве газа для наполнения буферного объема был выбран углекислый газ.

В целом пространственная форма (профиль) катода определяется не только «гидростатическими», но и электростатическими силами. Расчеты показали, что при совместном действии этих сил катод приобретает S-образную форму и его прогиб не превышает $|\Delta L_K| \leq 50$ мкм, что соответствует

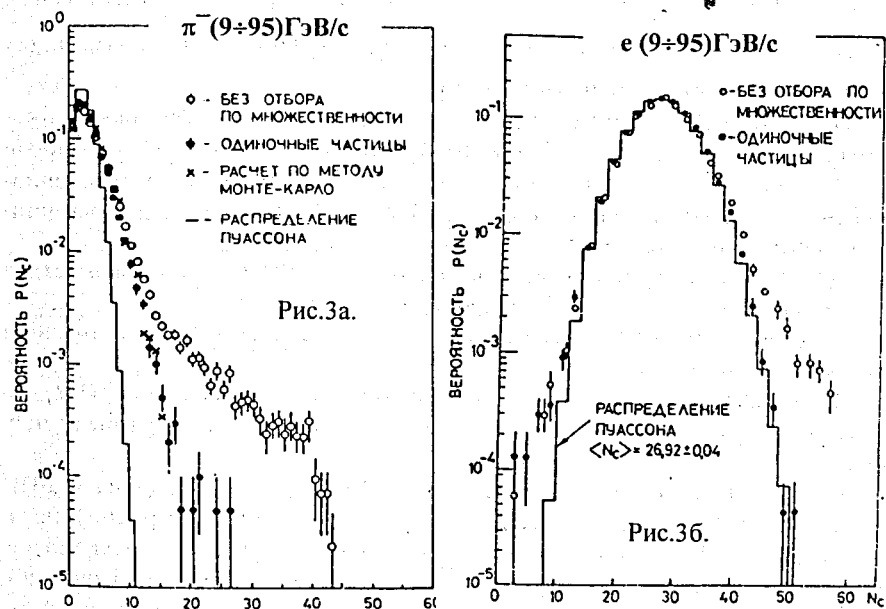


Рис.3. Распределение по числу зарегистрированных кластеров для π^- -мезонов (Рис.3а) и для электронов (Рис.3б).
Значение параметра λ , используемое для построения распределения Пуассона, получено из соотношения $\lambda = -\ln P(0)$, где $P(0)$ - вероятность не зарегистрировать ни одного кластера на одну прошедшую частицу.

$$|\Delta M/M|_{\text{макс.}} \leq 5\%.$$

Проведенные измерения флуктуаций КГУ по площади всех пропорциональных камер, входящих в состав ДПИ, подтвердили результаты расчетов и показали обоснованность выбора и оптимизации всех использованных конструктивных и технологических решений. Максимальные флуктуации КГУ в любой из камер ДПИ полностью удовлетворяют требованиям эксперимента и не превышают 12% как вдоль оси X, так и вдоль оси Y.

В ходе эксперимента были детально исследованы отклики ДПИ на прохождение как π^- -мезонов, так и электронов. Были разработаны и реализованы алгоритмы работы ДПИ в составе экспериментальной установки, обеспечившие максимально высокий коэффициент режекции π^- -мезонов (на уровне

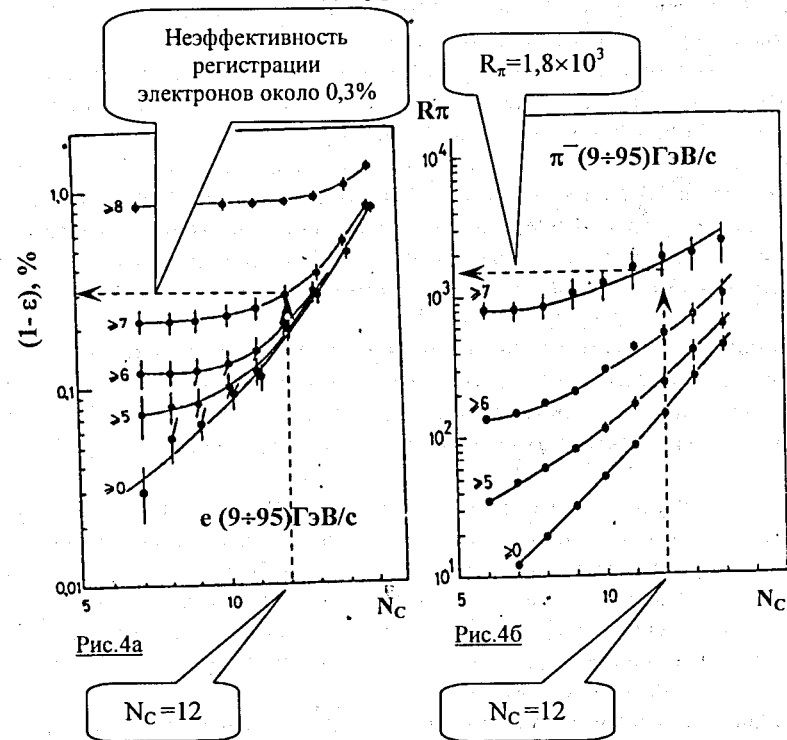


Рис.4. Неэффективность регистрации электронов (Рис.4а) и величина коэффициента режекции π^- -мезонов (Рис.4б) как функция от порога по числу зарегистрированных кластеров для разных значений порога по числу сработавших камер ДПИ.

$R_{\pi^-} \approx 10^5$).

В качестве критерия для выделения электронов использовалось полное число ионизационных кластеров N_C , измеренных для всех модулей ДПИ. Применение дополнительного критерия – число «активных» камер N_a (где возник хотя бы один кластер) позволило увеличить коэффициент режекции пионов еще в 5-6 раз.

На Рис.3 приведены распределения событий для π^- мезонов (Рис.3а) и электронов (Рис.3б) по числу зарегистрированных ионизационных кластеров N_C в интервале энергий $9 \div 55$ ГэВ. На обоих рисунках даны распределения как для событий с одиночными частицами, так и для событий, в которых отбор по множественности не производился. Показано, что адронные и электромагнитные ливни, образующиеся в материале ДПИ, существенно искажают пуассоновские распределения в области больших значений N_C как для π^- мезонов, так и для электронов. Демонстрируется эффективность работы предложенного алгоритма отбора событий, не содержащих электромагнитных ливней, вызванных взаимодействием с материалом детектора.

Видно (Рис.3а), что оценка коэффициента режекции π^- мезонов в данном детекторе по распределению Пуассона со средним числом, равным числу δ -электронов с энергией выше некоторого порога, приводит к существенно завышенному результату». Адекватный учет обсуждавшихся выше эффектов возможен только в расчёте по методу Монте-Карло. Результат такого расчёта согласуется с полученными данными (Рис.3а).

Из Рис.3б следует, что экспериментальное распределение числа зарегистрированных кластеров для событий, в которых электрон не образовал ливня, хорошо описывается распределением Пуассона со средним $\langle N_C \rangle = 26,92 \pm 0,04$. Расчёт по методу Монте-Карло даёт очень близкую величину $\langle N_C \rangle = 27,04 \pm 0,16$.

Неэффективность регистрации электронов и величина коэффициента режекции π^- мезонов как функция от порога по числу зарегистрированных кластеров для разных значений порога по числу сработавших камер ДПИ приведены соответственно на Рис.4а и 4б. На основании этих данных легко вычисляется взаимосвязь коэффициента режекции пионов и эффективности регистрации электронов, которая, по существу, является базовой характеристикой детектора переходного излучения.

Видно, что выбранному условию триггера на электрон - число сработавших камер ДПИ $N_C \geq 12$ и число сработавших камер $N_a \geq 7$ - соответствует неэффективность регистрации электронов $(1-\epsilon_e) = 0.3\%$ и коэффициент режекции π^- мезонов $R_{\pi^-} \approx 1,8 \times 10^3$. Эффективность найденных алгоритмов выделения электронов на фоне мощного фона адронных распадов наглядно представлена на Рис.5.

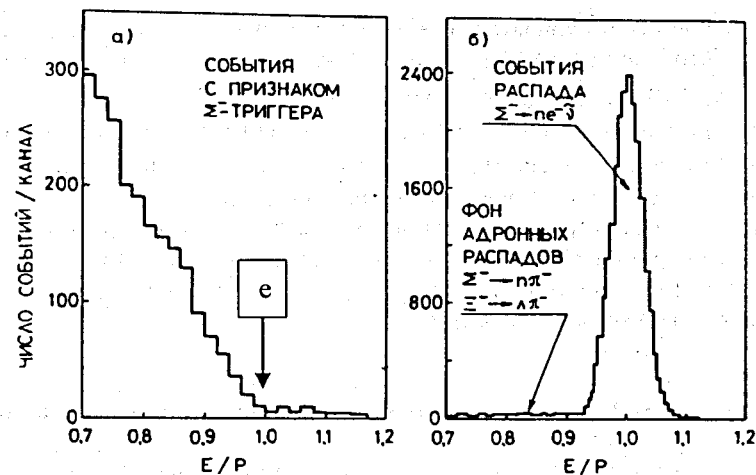


Рис.5. Распределение событий по величине E/p (где E – энергия частицы, измеренная в LG – калориметре, p – ее импульс) для распадов $\Sigma^- \rightarrow \pi^- e^- \nu$ и $\Sigma^- \rightarrow \pi^- \pi^-$ без идентификации e^- (а) и с идентификацией e^- с помощью ДПИ и калориметра LG (б).

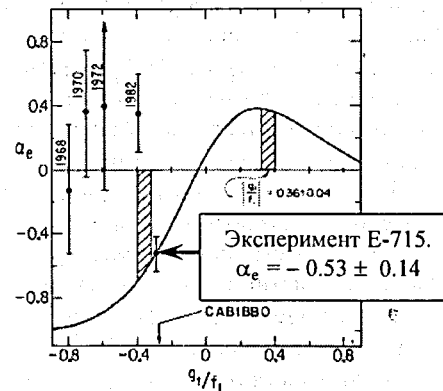


Рис.6. Электронная асимметрия как функция от величины g_1/f_1 . Заштрихованные области показывают результаты, полученные в ряде предыдущих экспериментов. Сплошная линия - результаты расчетов в соответствии с предсказаниями теории Кабиббо.

В нашем эксперименте удалось реализовать максимально высокий коэффициент режекции пионов с помощью ДПИ по сравнению с другими экспериментами, в которых использовались ДПИ (Б.А.Долгошеин, NIMA A252 (1986) 137-144).

В эксперименте E-715 было накоплено около 90000 β -распадов Σ^- -гиперонов. Было показано (Рис.6), что полученная величина электронной асимметрии очень близка к предсказанной и составляет $\alpha_e = -0.53 \pm 0.14$. В результате дальнейшего анализа всех накопленных событий β -распада поляризованных

Σ^- -гиперонов были окончательно определены знаки и абсолютное значение коэффициентов асимметрии в угловом распределении продуктов распада: $\alpha_e = -0.519 \pm 0.104$; $\alpha_\pi = -0.509 \pm 0.102$; $\alpha_\nu = -0.230 \pm 0.061$.

Этот результат отлично согласуется с теоретическими предсказаниями ($\alpha_e = -0.51 \pm 0.004$) и разрешает в пользу теории существовавшее долгое время противоречие между гипотезой Кабиббо и экспериментом.

Высокие параметры детектора переходного излучения, продемонстрированные в эксперименте E-715, его надежная работа и простота считывающей электроники позволили уверенно планировать использование этого класса детекторов в физике высоких энергий.

1.2. Эксперимент E-761. Исследование радиационных распадов гиперонов.

После завершения E-715 был предложен и принят новый эксперимент E-761 (1986-1995г.г.), в котором предлагалось решить ещё одну проблему в физике гиперонов [4].

Мотивация. Радиационные распады гиперонов представляют класс редких барионных распадов, которые требуют вклада как слабых, так и электромагнитных взаимодействий. В своей фундаментальной теореме Хара Y. Нага, (Phys.Rev.Lett., 12 (1964) 378) утверждает, что коэффициенты асимметрии в радиационных распадах $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ и $\Xi^- \rightarrow \Sigma^-\gamma$ в пределах SU3 – симметрии равны нулю. Более того, имевшиеся в то время экспериментальные результаты в распаде $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ и этот факт не могла объяснить ни одна из существовавших тогда теорий. Существенно отметить, что экспериментальные данные были основаны на очень малой статистике (около 300 событий) и были серьезные сомнения в достоверности этих результатов. В новом эксперименте предполагалось не только многократное увеличение статистики, но и, что самое главное, надежное выделение реакции $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ на фоне в 400 раз более интенсивной реакции $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0 \rightarrow p2\gamma$, кинематика которого подобна кинематике исследуемого процесса, а в конечном состоянии образуются одни и те же частицы. К тому же коэффициент асимметрии в фоновом распаде $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$ как раз имеет большую отрицательную величину $\alpha_\pi = -0.980 \pm 0.016$, которая может имитировать наблюдаемую асимметрию в изучаемом распаде $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$. Таким образом, возникла необходимость в постановке нового эксперимента (E-761), целью которого явилось бы измерение парциальных вероятностей и параметра асимметрии для распада $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ с высокой статистической точностью и малыми систематическими ошибками. Коллаборация E-761 избрала руководителем эксперимента директора ПИЯФ РАН А.А.Воробьева.

Из нашего опыта, полученного в ходе подготовки и проведения эксперимента E-715, мы поняли, что научились достаточно хорошо просчитывать отклик детектора и понимать диапазон его возможностей. Поэтому в этом эксперименте было предложено использовать ДПИ в необычном качестве – как гамма детектор с высоким пространственным разрешением. [4].

Фотонный спектрометр был выполнен на базе ДПИ. Координатная часть фотонного спектрометра (Рис.7.) состояла из двух независимых секций, каждая из которых имела стальной конвертор, пропорциональную камеру (PWC) и два ДПИ (TRD). Главная идея состояла в том, чтобы из электромагнитного ливня выделить высокоэнергичные электроны (позитроны), которые хорошо сохраняют исходное направление движения падающих фотонов, в то время как низкоэнергичные электроны (позитроны) имеют значительно более широкое распределение. ДПИ был выбран для этой цели еще и потому, что это пороговый детектор. Он детектирует с высокой эффективностью электроны (позитроны) с энергиями выше 2.5 ГэВ/с и является практически нечувствительным к электронам энергией менее 1 ГэВ/с. Средняя энергия фотонов из реакции $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ распада составляет 50 ГэВ/с. Фотоны конвертировались в одной из двух стальных плит толщиной 2.54см (1.54 радиационной длины ка-

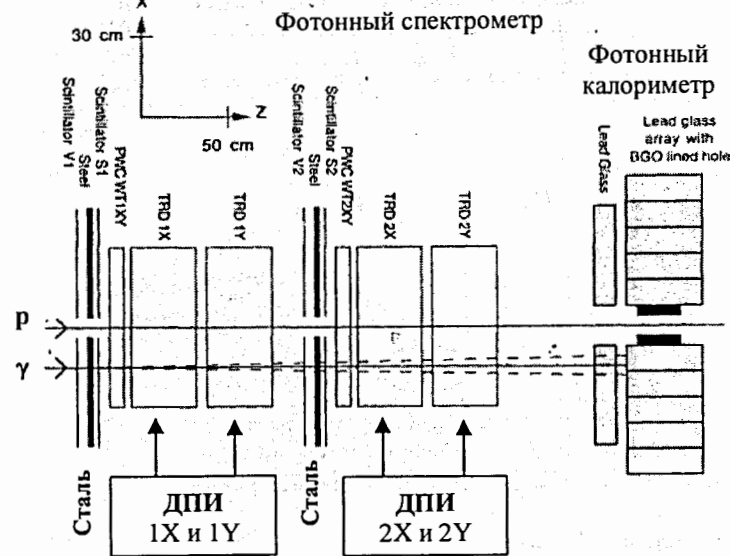


Рис.7. Фотонный спектрометр. Положение электромагнитного ливня в стальном конверторе измеряется пропорциональными камерами (PWC) и ДПИ (TRD). Энергия фотонов измеряется в фотонном калориметре.

жда). Энергия фотонов измерялась фотонным калориметром, который имел достаточно стандартную гранулярную структуру и состоял из тяжелого стекла и кристаллов BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$). Так как полная энергия, наблюдаемая в калориметре, примерно одинакова для обоих процессов $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ и $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0 \rightarrow p2\gamma$, то, при попытке разделить эти распады, пространственное разрешение ДПИ становится наиболее важным критерием отбора, по-сравнению с энергетическим разрешением.

На Рис.8а представлена X-проекция-координаты заряженной частицы в электромагнитном ливне, которая была измерена в камерах (PWC) и ДПИ (TRD). Это событие интерпретируется как ливень, созданный одиночным фо-

тоном из Σ^+ радиационного распада в первом стальном конверторе. PWC детектируют все заряженные частицы в ливне. При этом структура работавших проволочек в PWC имеет широкое и равномерное распределение, что подтверждает предположение о приходе одного гамма кванта. ДПИ чувствителен к наиболее энергичной заряженной компоненте электромагнитного ливня и поэтому сигналы, пришедшие с проволочек, группируются в пик, центр тяжести которого соответствует оси ливня. При этом амплитуда события в ДПИ соответствует числу импульсов, детектируемых каждой проволочкой. Важно отметить, что ДПИ нечувствителен к протонам, в то время как PWC их регистрирует.

На Рис.8б представлен сигнал с ДПИ для распада, который интерпретируется как $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$. Можно видеть, что при этом возникают два широких кластера с каждой стороны от предсказанного положения трека π^0 , которые образуются от двух гамма квантов.

Результаты, полученные после проведения вышеупомянутых отборов, представлены на Рис.9, где возможность эффективного отбора полезных событий представлена в виде трехмерного распределения событий. Видно, что отбор событий по энергии и координате фотона, измеренной в детекторе переходного излучения, позволил надежно выделить радиационный распад $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ (белый эллипс) на фоне адронного распада $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$.

В результате анализа около 35000 событий радиационного распада $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ была получена следующая величина параметра асимметрии распада:

$\alpha_\gamma = -0.720 \pm 0.086$ (стат. ± 0.045 (сист.)), и на основе анализа примерно 32000 событий – величина вероятности распада $V(\Sigma^+ \rightarrow p\gamma) = (1.20 \pm 0.08) \times 10^{-3}$ (указана суммарная ошибка). Таким образом, результаты, полученные в эксперименте E-761, подтвердили, что

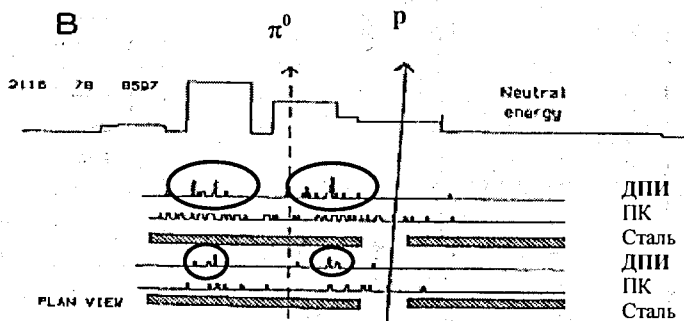
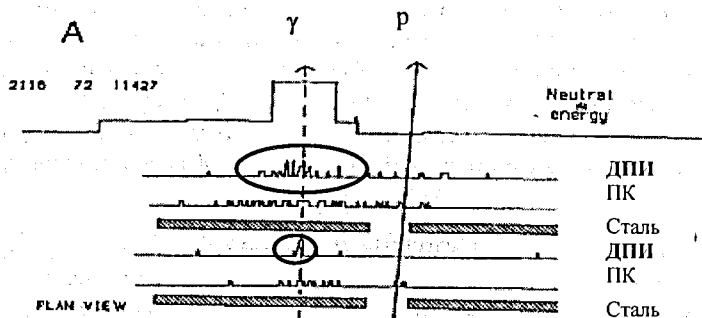


Рис.8. Отклик ДПИ для

(А) $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ (ДПИ $\chi^2 = 0.15$; $M_{\chi^0}^2 = 7.43 \times 10^{-4} \text{ ГэВ}^2/c^4$);

(В) $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$ (ДПИ $\chi^2 = 50.0$; $M_{\chi^0}^2 = 0.0164 \text{ ГэВ}^2/c^4$).

$(P_2 - P_1)^2$ vs $(P_1 - P_2)^2$ for $\Sigma \rightarrow p\gamma$ and $\Sigma \rightarrow p\pi^0$
only one γ is detected

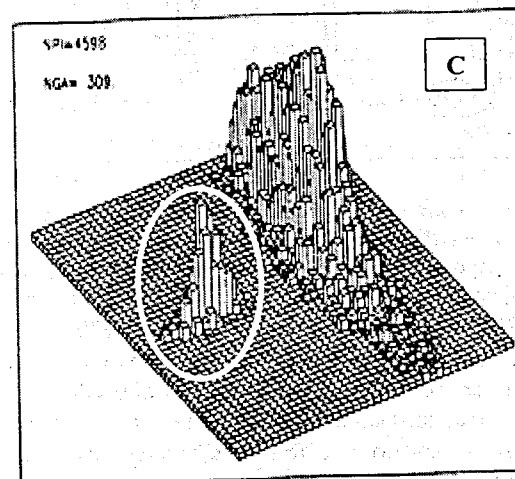


Рис.9. Распределение χ^2 ДПИ как функция от величины $M_{\chi^0}^2$ в виде трехмерного распределения полученных событий.

в радиационном распаде действительно наблюдается большая по величине и отрицательная по знаку асимметрия, а наблюдаемая вероятность распада не содержит вклада от примеси событий интенсивной адронной моды распада $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$. В эксперименте, в дополнение к основной программе, была измерена поляризация различных гиперонов.

1.3. Эксперимент E-781. Исследование рождения С-барионов и их спектроскопия.

Дальнейшее изучение свойств очарованных барионов было продолжено в эксперименте SELEX (E-781) в 1996-98г.г. во ФНАЛ.

Мотивация. Созданный спектрометр не был ориентирован на решение (исследование) какого-то одного или нескольких физических процессов, как это было в предыдущих экспериментах E-715 и E-761. Накопленный опыт работы в этих экспериментах позволил предложить создание сложнейшей экспериментальной установки SELEX – спектрометр (Segmented Large-X Barion Spectrometer) [5], позволяющей проводить систематические исследования широкого класса ядерных реакций, связанных с рождением очарованных барионов и их распадами.

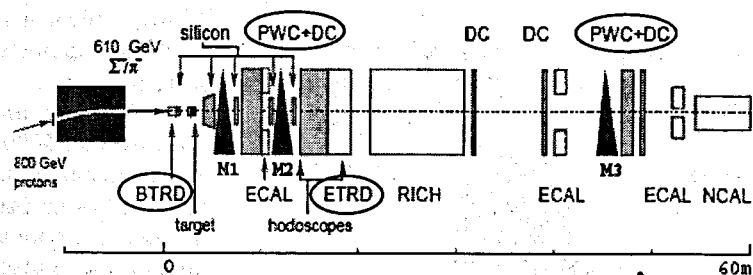


Рис.10. Блок-схема экспериментальной установки. BTRD – пучковый детектор переходного излучения (ДПИ); ETRD – электронный детектор переходного излучения (ДПИ); EMCL – электромагнитный калориметр; PWC – пропорциональные камеры; DC – дрейфовые камеры; RICH – черенковский детектор; NCAL – нейтронный калориметр; M1, M2 и M3 –анализирующие магниты.

Спектрометр предполагал отход от базового подхода, связанного с рождением необходимых частиц непосредственно в мишени (central production), и ориентировался на регистрацию частиц, вылетающих в переднюю полусферу (leading production). Это позволяло работать не только с гиперонами, родившимися в мишени, но и с теми частицами, которые являются продуктами их распада. Для этого структура спектрометра предусматривала возможность реконструкции двух вершин с хорошим пространственным и, соответственно, угловым разрешениями.

Спектрометр разрабатывался исходя из того, что он должен содержать широкий набор методов идентификации частиц и позволял осуществлять надежное триггерирование необходимых событий. Работа с частицами, вылетающими в переднюю полусферу, означала, что в рассмотрение включаются новые физические процессы, регистрация которых требует идентифицировать частицы с достаточно большим поперечным импульсом $X_F > 0.25$.

В работе приводится описание экспериментальной установки (Рис.10) Чрезвычайно важной особенностью спектрометра SELEX явилось наличие системы полной идентификации частиц, которая базировалась на созданных в ПИЯФ РАН детекторах:

- пучковый ДПИ для разделения частиц на уровне входного пучка (Σ^-/π^+ , p/π^+);
- электронный ДПИ для того, чтобы идентифицировать вторичные электроны (e^+);
- трековую систему, которая состоит из: трех анализирующих магнитов; 26 плоскостей пропорциональных камер (PWC) с пространственным разрешением около 0.8мм; трех станций дрейфовых камер (DC), каждая из которых содержала 26 плоскостей с пространственным разрешением около 100 микрон

Электроника пучкового ДПИ обеспечивала выработку быстрого триггера для идентификации Σ^- или π^- за время менее 100 нсек. Этот ДПИ позволил очень надежно идентифицировать барионы и мезоны пучка. Электронный ДПИ успешно использовался при изучении процессов, требующих идентификации электронов в конечном состоянии.

На установке SELEX были получены уникальные физические результаты. Это – выходы очарованных гиперонов, измерены зарядовые радиусы Σ^- гиперонов, измерены полные сечения рассеяния Σ^- , π^- и протонов на ядрах вблизи 600 ГэВ/с и т.д. Детальное обсуждение алгоритмов и методики обработки полученных результатов можно найти в работах [6-14].

Глава 2. Трековые системы для исследования эффектов каналирования протонов монокристаллами.

Впервые экспериментальная реализация идеи управления траекториями заряженных частиц с помощью изогнутого кристалла была, осуществлена в 1979г. в Дубне на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ (Е.Н.Цыганов и др.): пучок протонов с энергией 8,4 ГэВ с помощью изогнутого кристалла кремния длиной 2 см был повернут на угол 26 мрад.

В данном разделе диссертации обсуждаются два эксперимента, выполненные в 1981-82 г.г. в ЛИЯФ РАН (сейчас – ПИЯФ РАН), в результате которых: было доказано существование эффекта объемного захвата; показано вы-

полнение принципа обратимости для частиц в процессе объемного захвата; обнаружен эффект угловой фокусировки частиц. Именно начиная с этих экспериментов, в ЛИЯФ РАН начались широкие исследования эффектов каналирования частиц монокристаллами.

В экспериментальных установках были применены два взаимодополняющих метода: первый метод – это использование изогнутого монокристалла выделяющий каналирующие частицы и идентифицирующий такие частицы по их энергетическим потерям; второй метод – это трековая система, детектирующая факт поворота (или фокусировки) частиц. Это позволило:

- осуществлять предварительный отбор частиц в монокристалле по их энергетическим потерям и изучать их распределение в трековой системе;
- используя инверсный метод, можно было взять уже отобранные трековой системой частицы и изучить их энергетические потери и поведение в монокристалле более детально.

Целью нашего первого эксперимента являлась проверка гипотезы о возможности захвата частиц в режим каналирования как на торце, так и в объеме изогнутого кристалла [15-18].

В работе детально описывается экспериментальная установка. Пучок протонов (p) с энергией 1ГэВ проходил через пропорциональные камеры ПК1, ПК2 и сцинтилляционный счетчик S1 и попадал на изогнутый монокристалл (С). Из прямого пучка выделялись те протоны, которые попадают на торец кристалла, и измерялись углы их входа в кристалл (угловое разрешение 0.19 мрад). Пропорциональная камера ПК3 регистрировала угловое распределение выходящих из кристалла частиц с угловым разрешением 0.41 мрад. Изогнутый монокристалл (С) был изогнут по цилиндру с радиусом $R=46$ см. Его вырезка была такова, что его большая грань была параллельна плоскости (111) и изогнута по цилиндрической поверхности. Пучок падал на грань параллельную плоскости (011). На изогнутом монокристалле толщиной 0.4 мм, шириной – 25мм и длиной по пучку – 10мм, изготовленном из полупроводникового кремния, были реализованы три независимые детектирующие структуры (ПД1, ПД2, ПД3), являющимися поверхностно-барьерными полупроводниковыми детекторами. Это позволяло контролировать движение частиц в кристалле на всех стадиях: захват, каналирование, деканалирование по величине ионизационных потерь, оставляемых в этих чувствительных областях.

Процесс измерения (Рис.11) заключался в определении спектра ионизационных потерь частиц на различных участках кристалла (в областях ПД1-ПД3) и в наблюдении угловых распределений частиц, выходящих из кристалла, в зависимости от угла поворота ϕ . Каналирующими считались частицы, имеющие аномально малые ионизационные потери в детекторах ПД1-ПД3 (меньше 0.74 от наиболее вероятных потерь для "прямого" пучка). В качестве второго критерия, подтверждающего тот факт, что частицы с малыми удель-

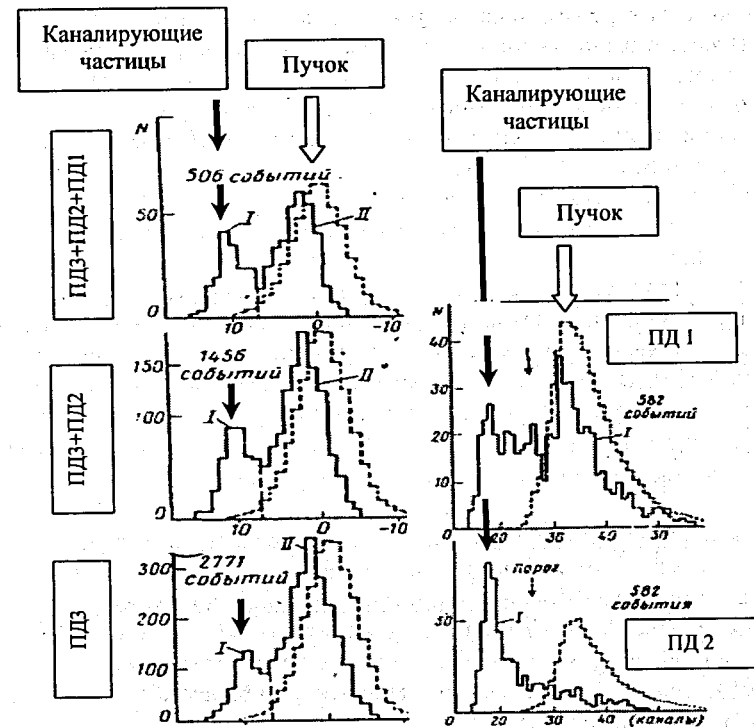


Рис.11а. Угловые распределения частиц, прошедших кристалл с отбором по критерию малой амплитуды. Угол поворота $\phi = 11$ мрад.

Рис.11б. Амплитудные спектры частиц в ПД 1 и ПД 2. Отбор событий – по ПД 3.

ными потерями являются каналированными частицами, служило наличие отклоненной фракции пучка с малой угловой расходимостью при выходе из кристалла.

На основе полученных экспериментальных данных можно однозначно заключить, что выделяемые частицы являются каналирующими. Из этих данных также следует существование объемного захвата в режим каналирования. Характерным признаком каналирования является появление пика в области малых амплитуд (соответствует приблизительно половине амплитуды наиболее вероятных потерь неканалирующих частиц), что и наблюдается особенно отчетливо для ПД2.

Видно (Рис.11), что многие частицы, попавшие в область пиков I или II, не были каналированными в ПД1 (имели большие ионизационные потери) и

были захвачены в режим каналирования только на больших глубинах в кристалле. Впервые было показано, что область захвата частиц в режим каналирования изогнутым кристаллом отнюдь не сосредоточена только вблизи ее входного торца, а может реализоваться по всей длине кристалла, так как суммарный угловой интервал захвата частиц составил ~ 20 мрад, тогда как угол Линдхарда равнялся ~ 0.12 мрад при угловой расходимости пучка ~ 1 мрад, что соответствует захвату практически на всей длине кристалла (1см). Этот физический процесс авторы назвали "эффектом объемного захвата" в режим каналирования.

Таким образом, в ходе этого эксперимента, впервые удалось продемонстрировать возможность поворота пучка протонов с энергией 1 ГэВ на угол 11 мрад. Высокое угловое разрешение экспериментальной установки позволило разделить эффекты для различных кристаллографических плоскостей и оценить значение вероятности объемного захвата в режим каналирования для 1 ГэВ протонов в канал плоскости (111), изогнутой по радиусу $R=46$ см ($\beta_0=9.2 \pm 1.4\%$), и, соответственно, длину деканалирования ($\lambda=1.26 \pm 0.09$ мм).

Во втором эксперименте [19-21] была исследована возможность использования изогнутого кристалла, являющегося одновременно полупроводниковым детектором, в качестве фокусирующего коллиматора каналирующих частиц. Использовался монокристалл кремния, изогнутый по цилиндру ($R=2$ м), с кристаллографическими плоскостями (111), перпендикулярными к вогнутой (выпуклой) грани кристалла, являющейся одновременно поверхностно-барьерным детектором (ПД1 и ПД2).

На кристалл направлялся широкий (во весь кристалл) пучок с угловой расходимостью 7,2 мрад. Использование кристалла в качестве полупроводникового детектора позволяло выделять ("метить") каналирующие частицы по величине их аномально малых ионизационных потерь. Поскольку при изгибе по цилиндру кристаллографические плоскости, нормальные к граням, разворачиваются веерообразно с центром на расстоянии радиуса изгиба кристалла, то каналирующие между ними частицы будут фокусироваться в точку «О». Предварительные оценки показали, что ширина фокуса должна составлять от 50 до 600 мкм.

Для наблюдения таких пространственных распределений необходимо было создать новую трековую систему, базирующуюся на позиционно-чувствительных детекторах, имеющих пространственное разрешение практически предельное для газоразрядных приборов. В связи с этим было решено использовать пропорциональную камеру (ПК) с аналоговым съемом информации с катодом на линию задержки, потенциальные возможности которой позволяли обеспечить требуемое пространственное разрешение ($\sigma \leq 100$ мкм). Проведенные исследования показали, что разработанные камеры обладают высокими измерительными характеристиками: в рабочей области камеры (30×30

мм) пространственное разрешение не хуже $\sigma \approx 40$ мкм, а дифференциальная нелинейность не превышает 3%.

Это позволило осуществить экспериментальное наблюдение узкого пика (см. Рис.12, кривая 1) в распределении частиц в фокальной плоскости с «включением» отбора по малым амплитудам, что ясно демонстрирует существование нового эффекта: изогнутый монокристалл может работать как фокусирующий коллиматор каналирующих частиц. Пик хорошо обеспечен статистически и имеет ширину $FWHM=0.65 \pm 0.05$ мм, что соответствует угловой расходимости, определяемой углом Линдхарда (0.12 мрад) для данной кристаллографической плоскости (111).

В работе детально обсуждается влияние различных факторов на пространственное разрешение детекторов с катодным съемом информации, входящих в трековую систему, с точки зрения того, как они влияют на собственное (внутреннее) разрешение газоразрядного детектора частиц как такового. Оптимизируя эти факторы можно оценить то предельное пространственное

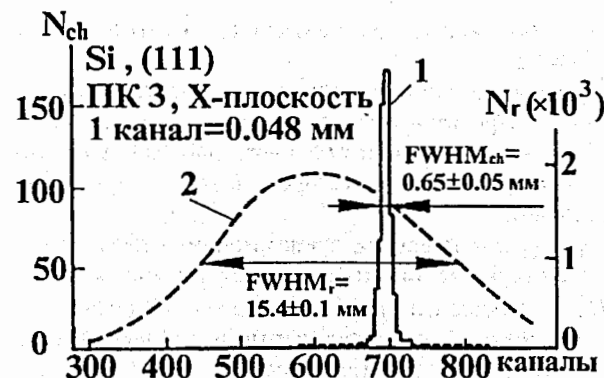


Рис.12. Пространственное расположение пучка на X плоскости (ПКЗ): 1 — с отбором по критерию малой амплитуды сигнала с детектора (в интервале 0.3±0.6 от наиболее вероятного значения для хаотической фазы), 2 — без отбора (прямой пучок).

разрешение, которое может быть достигнуто для данного класса детекторов. Поскольку речь идет о пространственном разрешении на уровне лучше 100 мкм, то для проведения подобных исследований необходимо уметь создавать «пробные заряды» размерами в десятки микрон, что само по себе является весьма серьезной проблемой, и исследовать отклик прибора на них.

Для этого был применен метод измерения предельного пространственного разрешения камер с помощью эффекта фокусировки ионного облака. Идея метода заключается в том, чтобы изучать внутреннее пространственное разрешение детектора, измеряя положение и пространственное распределение «пробного заряда», который является облаком ионов. Предлагается исследовать положение и точность локализации в пространстве центра тяжести ионного заряда лавины, образованной вблизи анодной проволоочки. Этот заряд хорошо сфокусирован в пространстве электрическим полем самой камеры и

по своей физической природе имеет минимальные пространственные размеры, которые и определяют предельное разрешение детектора.

Измерения показали, что эффект фокусировки заряда настолько силен, что при размерах исходного пучка $\sigma_{\text{пучка}} \leq 120$ мкм, размеры регистрируемого зарядового облака сжимаются до величины $\sigma \leq 20$ мкм.

В итоге, был предложен и успешно применен метод, в результате реализации которого:

- разработана методика оптимизации измерительных характеристик камеры, позволившая довести ее внутреннее разрешение практически до физического предела, обусловленного физическими размерами ионного облака лавины, которое использовалась в качестве «пробного заряда».

- показано, что можно добиться, чтобы внутреннее пространственное разрешение детектора составляло: не хуже $\sigma \approx 20$ мкм (для γ -квантов с энергией $E_\gamma = 5.9$ кэВ); не хуже $\sigma \approx 50$ мкм (для заряженных частиц).

Глава 3. Разработан и создан торцевой координатный детектор FTC для экспериментальной установки L3

Третья глава диссертации посвящена описанию экспериментальной установки и задач эксперимента L3. Представлено описание каждого из основных детекторов в установке L3, включая торцевой координатный детектор FTC, ответственность за разработку и создание которого была возложена на группу, возглавляемую соискателем.

Установка L3 предназначена для проверки предсказаний и параметров Стандартной Модели. Все детекторы установки находятся внутри магнита (диаметром ≈ 11 м и длиной 12 м), создающего магнитное поле 0,5 Тл. Начиная от точки взаимодействия e^+e^- пучков в L3 находятся: центральный вершинный детектор на основе дрейфовой камеры «растянутого времени» - ТЕС, электромагнитный калориметр BGO., состоящий из кристаллов ортогерманата висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, урановый адронный калориметр и мюонный спектрометр, состоящий из набора дрейфовых камер.

Торцевому координатному детектору FTC было отведено место (всего 72 мм по оси пучка Z) в зазоре между ТЕС и калориметром BGO. Детектор предназначался для регистрации и измерения треков частиц, входящих в торцевую часть калориметра BGO в диапазонах полярных углов $14^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$ и $145^\circ \leq \theta \leq 166^\circ$, не перекрываемых детектором ТЕС. Необходимость точного определения координат и направления частиц обуславливалась многократным кулоновским рассеянием частиц в алюминиевом фланце ТЕС. Для выполнения этой задачи FTC должен был обеспечивать:

- пространственное и угловое разрешение координат и направлений треков частиц $\sigma \leq 150$ мкм и 10 мрад, соответственно;

- одновременную регистрацию треков $5 \div 7$ частиц;
- надёжную работу в течение не менее 2+3 лет без ремонта;

Выбор конструкции детектора жёстко обуславливался условиями его размещения в установке L3. Во-первых, замкнутость и ограниченность пространства в зазоре ТЕС-BGO создали крайне серьезные трудности в реализации требуемых рабочих характеристик FTC. Этот же фактор ограничил пространство для установки предусилителей, прокладки кабелей и систем газобеспечения, что обусловило необходимость минимизации числа каналов электроники. Невозможность размещения системы охлаждения потребовало предельно минимизировать тепловыделение прidetекторной электроники. Во-вторых, конструкция детектора должна была обеспечить высокую надёжность и радиационную стойкость в течение нескольких лет работы без доступа персонала.

Детектор FTC был создан [22-28] на базе дрейфовых камер (модулей) скомпонованных в две пары дисков диаметром 1 метр, развернутых друг относительно друга на 90 градусов, что обеспечивает одновременное измерение X и Y координат трека частицы с обеих сторон от точки e^+e^- взаимодействия. Общее число модулей в каждом диске равно 26. Для защиты от электромагнитных наводок со стороны электроники и высоковольтного питания ТЕС и BGO диски FTC закрыты заземлёнными экранами из фольгированного стеклопластика G10.

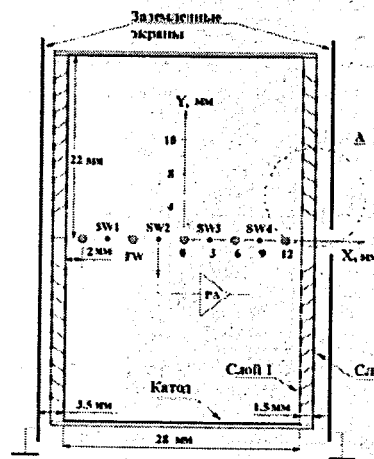


Рис.13а.

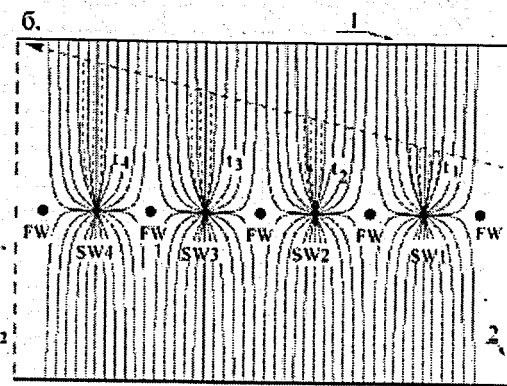


Рис.13б.

Поперечное сечение модуля FTC и идеальная структура эклектического поля в нем приведены на Рис.13а и 13б, соответственно. Там же показаны катод, полеформирующие (FW) и сигнальные анодные проволочки (SW). По-

лосковые электроды - стрипы (Слой 1 и Слой 2) задают электрическое поле в рабочем объёме детектора и обеспечивают его защиту от разрушающего влияния соседних заземлённых экранов.

В каждом модуле с каждой SW проволоочки несколько раз измерялись две (X и Y) координаты трека частицы: точно (вдоль направления дрейфового поля) – методом измерения времени дрейфа и вдоль проволоочки SW – методом деления заряда. Реализация подобного решения позволило успешно решить комплекс проблем: во-первых, точно измерять обе координаты трека частицы; во-вторых, измерять угол наклона трека частицы; в-третьих, обеспечить регистрацию многотрековых событий за счет предсказания координат треков частиц для точного их измерения модулями соседнего диска.

В работе проведен комплексный анализ структуры взаимосвязей основных факторов, влияющих на обеспечение линейности координатно-временной зависимости в FTC и его пространственного разрешения. Для создания одинаковых условий дрейфа электронов в дрейфовых ячейках (зоны регистрации проволоочек SW) модуля необходимо было обеспечить однородное электрическое поле в дрейфовом промежутке, одинаковые коэффициенты газового усиления (КГУ), стабильную температуру рабочего газа и минимизировать механические погрешности. Оптимизация влияния всех вышеперечисленных факторов на ожидаемую погрешность определения координаты трека частицы

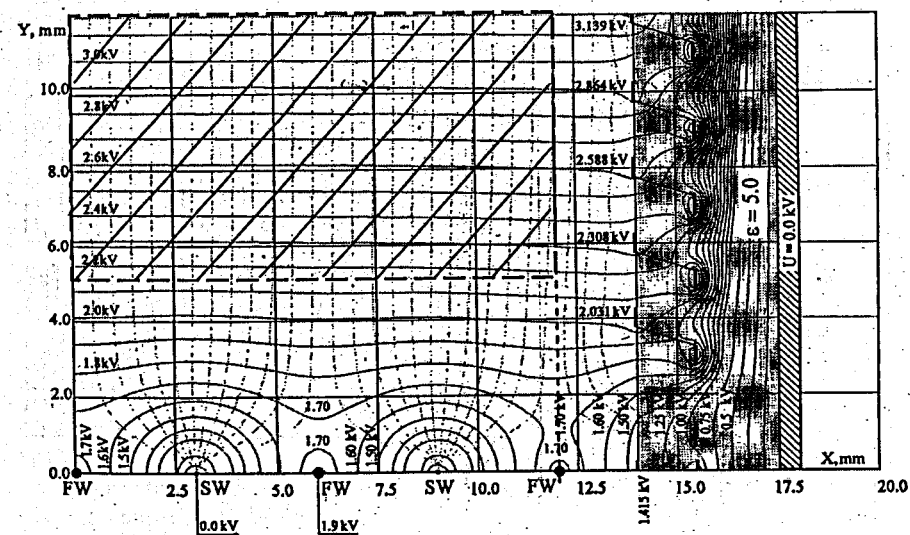


Рис.14. Компьютерная симуляция структуры электрического поля в модуле FTC при наличии двух слоёв полеформирующих стрипови заземлённого защитного экрана, установленного в 3,5 мм от границы внутреннего объёма. Внешний слой стрипов смещён на 1мм вниз относительно внутреннего.

позволила довести итоговое пространственное разрешение до $\sigma_x \approx 120$ мкм, что соответствовало требованиям L3.

Влияние магнитного поля установки L3 ($B = 0,5$ T) на FTC учитывать не требовалось благодаря поперечному расположению проволоочек SW по отношению к вектору В.

Значительное внимание было уделено формированию однородного электрического поля в модулях детектора FTC. Расчётным путём были выполнены:

- выбор оптимальной геометрии полеформирующих стрипов и их потенциалов, при которых неоднородность электрического поля в зоне дрейфа не должна превышать $|\Delta E/E| \leq 2\%$;
- расчёт структуры полеформирующих стрипов, обеспечивающей электростатическую защиту электрического поля в модуле от Разрушающего воздействия внешних заземлённых экранов.

Решение задач оптимизации конструкции и обеспечение требуемых характеристик FTC крайне осложнялось тем, что пространство, отведённое для размещения детектора, составляло всего 72мм по оси пучка. Поэтому для формирования однородного электрического поля внутри рабочего объёма модуля потребовалось одновременно минимизировать краевые неоднородности создаваемые полеформирующими стрипами и предотвратить искажающее влияние внешних заземлённых электродов.

Наиболее оптимальной оказалась геометрия с шириной стрипа $a = 0,5$ мм и шагом $S_{st} = 2$ мм, которая уже в 2 мм от боковой стенки ($X/S_{st} = 1$) обеспечивает высокую однородность электрического поля ($|\Delta E_y / E_{y0}| \leq 1\%$) при минимальном градиенте и абсолютной величине напряжённости поля на краях стрипа и посередине между стрипами. Это, практически, исключают микропробой между стрипами и возникновение самоподдерживающихся разрядов на их краях.

Проведенные измерения и расчеты показали, что внешние заземленные экраны практически полностью разрушают однородную структуру электрического поля в модуле.

Детальный анализ показал, что эту проблему можно решить применив специальную структуру полеформирующих стрипов, приведенную на Рис.14. Расчёты показали, что при этом в зоне дрейфа электронов с координатами $|X| \leq 12$ мм $5 \leq Y \leq 22$ мм (заштрихованная область) электрическое поле становится, практически однородным ($|\Delta E/E| \leq 0,5\%$), что обеспечивает постоянство скорости дрейфа на уровне $|\Delta V_{др}/V_{др}| < 0,08\%$.

Рабочие характеристики FTC полученные на протонном пучке с энергией $E_p = 1$ Гэв синхроциклотрона ПИЯФ и в ходе эксперимента L3 практически совпали. На Рис.15а приведена типичная зависимость координатного разрешения отдельной проволоочки SW от времени дрейфа электронов, измеренная в ходе эксперимента L3. В данном случае отбирались треки частиц, выле-

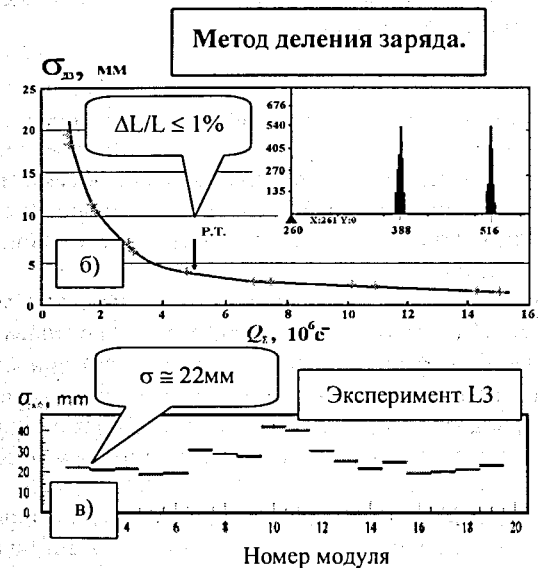
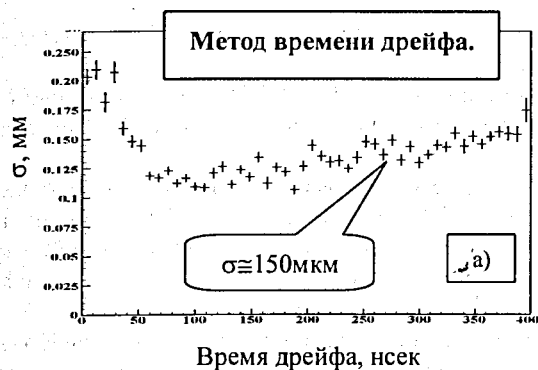


Рис. 15. Пространственное разрешение FTC.

Измерения показали, что достигнутая зависимость Y - T линейна почти во всём дрейфовом промежутке, кроме участка $|Y| = 1 \text{ мм}$ вблизи проволочек. При этом, нелинейность в диапазоне $|Y| = 2 \div 22 \text{ мм}$ не превышала 70 мкм .

Детектор FTC, как один из компонентов установки L3 постоянно участвовал в наборе данных. Так, использование детектора FTC при определении знака заряда частиц иллюстрируется на примере распада $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Другой пример использования FTC приводится в работе по исследованию предсказаний квантовой электродинамики для реакции $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$. Отбор событий этой

реакции осуществлялся с помощью детекторов ТЕС и FTC, перекрывавших интервалы косинусов углов вылета частиц $|\cos(\theta)| < 0,883$ и $0,833 < |\cos(\theta)| < 0,97$, соответственно. Причём три точки значений сечения реакции в области малых углов были получены исключительно с помощью FTC. Информация о треках заряженных частиц в ТЕС и FTC использовалась для идентификации γ -квантов в качестве "вето". Полученная эффективность "вето" составила $99,98\% \pm 0,02\%$.

Показано (Рис.15б), что требуемое разрешение метода $\sigma_{ДЗ} / \lambda \approx 1\%$ достигается в рабочей точке, которая соответствует заряду $Q_{\Sigma} = 5 \times 10^6 e^-$, образованному в дрейфовой ячейке треком минимально ионизирующей частицы, при газовом усилении $M = 8 \times 10^4$. В условиях эксперимента L3 пространственное разрешение координаты трека методом деления заряда оценивалось по распределению величины разницы между координатами, измеренными ТЕС и методом ДЗ (Рис.15в). При этом среднеквадратичное отклонение распределения для большинства модулей не превысило $\sigma \approx 22 \text{ мм}$, а относительное разрешение $|\Delta L/L| \leq 2\%$.

Глава 4. Трековая система на базе «магнитных» камер в эксперименте HERMES (DESY).

Глава 4. Трековая система на базе «магнитных» камер в эксперименте HERMES (DESY).

Основной задачей эксперимента HERMES является изучение спиновой структуры нуклонов путем исследования инклюзивных и полуинклюзивных процессов глубоко-неупругого рассеяния поляризованных позитронов (электронов) на поляризованных мишенях из водорода, дейтерия и гелия-3. Эксперимент, в отличие от предыдущих, позволяет изучать полуинклюзивные процессы, используя детектирование адронов в совпадении с рассеянным лептоном. Для существенного упрощения анализа данных, полученных в установке HERMES, предусмотрена возможность идентификации типа адронов (протоны, пионы, каоны).

Эксперимент HERMES проводится на ускорителе HERA в исследовательском центре DESY в г. Гамбурге, Германия. Ускоритель HERA представляет собой позитрон-протонный коллайдер. Поляризованный позитронный пучок имеет энергию $27,5 \text{ ГэВ}$, протонный пучок не поляризован и его энергия $\sim 920 \text{ ГэВ}$. В эксперименте HERMES используется поляризованный позитронный пучок, который рассеивается на газообразной "фиксированной" мишени. Угловой захват установки составляет $\pm(40 \div 140)$ миллирадиан в вертикальном направлении и $\pm(0 \div 170)$ миллирадиан в горизонтальном направлении. Таким образом, полный диапазон углов рассеяния составляет $40 \div 220$ миллирадиан. Это задает максимально возможную кинематическую область, в которой анализируются данные.

Детектор HERMES представляет собой магнитный спектрометр, включающий в себя трековые детекторы и детекторы для идентификации частиц. Напряженность магнитного поля составляет $B = 1,3 \text{ Тл}$. Угловой захват детектора разделен на верхнюю и нижнюю части металлической плитой, которая защищает позитронный и протонный пучки ускорителя от влияния магнитного поля магнита HERMES. В установке существует система идентификации частиц предназначенная для разделения позитронов, пионов, протонов и каонов TRD служит для разделения позитронов и пионов и имеет высокую эффективность такого разделения (90%) при энергии частиц больше 5 ГэВ . Трековая часть детектора состоит из следующих основных элементов (Рис.16): вершинные камеры VC, дрейфовые вершинные камеры DVC, передние дрейфовые камеры FC и задние дрейфовые камеры BC. Внутри зазора спектрометриче-

ского магнита установлена разработанная и созданная в ПИЯФ трековая система на базе пропорциональных камер (МС-спектрометр).

Треки частиц, которые получаются в результате реконструкции, делятся на 2 группы: «длинные треки» и «короткие треки» (Рис. 16).

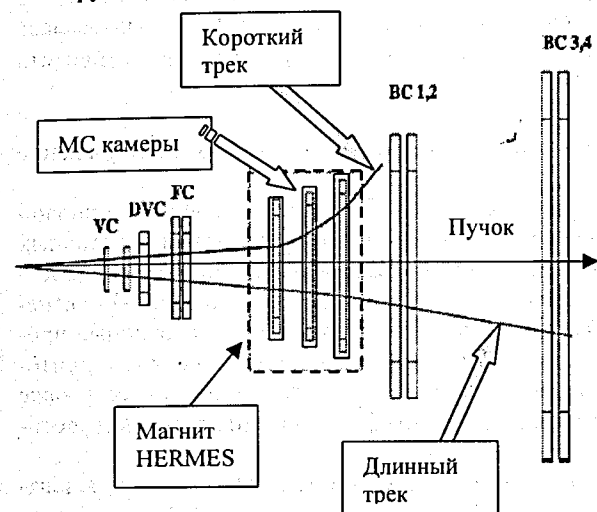


Рис. 16. Трековая система. Принцип разделения длинных и коротких треков.

- «Длинные треки» образованы частицами, прошедшими через весь спектрометр HERMES. Они реконструируются вершинными камерами VC и дрейфовыми камерами, установленными как до, так и после магнита DVC, FC, BC.

- «Короткие треки» реконструируются с помощью входных трековых детекторов, установленных перед магнитом, и МС-спектрометра, размещенного в зазоре спектрометрического магнита.

МС-спектрометр являлся одним из принципиально важных компонентов детектора HERMES [29,30], который позволяет:

- разделять многотрековые процессы при реконструкции событий;
- осуществлять импульсный анализ низкоэнергетичных продуктов распада за счет детектирования и реконструкции треков частиц с малыми импульсами, которые выходят за пределы магнита, не попадая в заднюю трековую систему HERMES(a).

Это позволяет изучать полуинклюзивные реакции, которые требуют детектирования и определения траекторий продуктов распада нестабильных частиц, которыми, например, могут быть пионы или протоны от распада Λ^0 гиперонов.

Каждый МС блок состоит из трех модулей: МС1, МС2 и МС3. Отдельный модуль содержит трех плоскости, в которых анодные проволоочки имеют три различные ориентации в пространстве $U(-30^\circ)$, $X(0^\circ)$ и $V(+30^\circ)$. Проволочки в X-плоскости натянуты вертикально с шагом 2мм. Камеры располагаются в зазоре магнита детектора HERMES и охватывают угловой диапазон $40 < |\theta_{\text{верт.}}| < 140$ миллирадиан по направлению вертикальной оси "У" и $0 <$

$|\theta_{\text{гориз.}}| < 170$ миллирадиан по направлению горизонтальной оси "Х", что соответствует входному углу детектора HERMES.

То, что МС-спектрометр размещался внутри магнита, наложило жесткие требования на конструкцию МС. В частности, требование эксперимента обеспечить максимальный вертикальный захват частиц «магнитными камерами» в условиях ограниченного пространства между полюсами магнита с неизбежностью приводило к необходимости резкого уменьшения ширины несущих алюминиевых рам камер. Их длинные стороны были очень узкими и поэтому не обеспечивали требуемой жесткости, а значит - механической устойчивости МС. В результате рамы прогибались в вертикальном направлении на такую большую величину, которая с точки зрения устойчивости работы МС совершенно недопустима. Проблема оказалась очень серьезной и от ее решения зависела реальная возможность создания качественного спектрометра на основе МС внутри магнита.

Решение было найдено путем разработки специального метода компенсации деформации рам. Для того, чтобы минимизировать разрушающее влияние деформаций наружных рам на работу МС, была предложен и реализован компенсационный метод, включающий в себя статическую и динамическую составляющие. Было подтверждено экспериментально, что разработанный метод компенсации деформации тонких поддерживающих рам МС эффективно предотвращает практически любые механические не стабильности рам и гарантирует стабильную работу детекторов без доступа в течение многих лет.

В ходе эксперимента было показано, что эффективности плоскостей МС для реконструированных событий, выделенных установкой HERMES для частиц с энергией более 3 ГэВ, находятся в диапазоне 96.8%–99.6%. При этом эффективность регистрации «МС камерами» коротких треков, которые детектировались передней трековой системой установки HERMES, составляет практически 100%. Кроме этого, в работе заметное место отведено методике

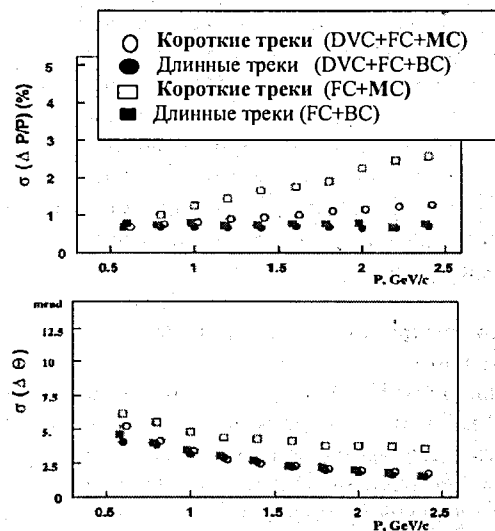


Рис. 17. Импульсное и угловое разрешения, полученные для коротких и длинных треков, при различных комбинациях использования информации с различных трековых детекторов.

эксперимента, а именно, исследованию характеристик работы пропорциональных камер, установленных в зазоре спектрометрического магнита, которые позволяют реконструировать треки низкоэнергетичных частиц. Проведено исследование угловых и импульсных характеристик спектрометра для треков, реконструируемых с помощью «МС камер».

На Рис.17 показаны импульсное и угловое разрешения, полученные для длинных и коротких треков частиц при различных методах учета информации с передней части трековой системы установки HERMES. Видно, что наилучший результат достигается, если в реконструкции участвуют «МС камеры» совместно с трековыми детекторами, размещенными перед магнитом (DVC+FC+MC). В этом случае импульсное и угловое разрешения для коротких и длинных треков очень близки.

В частности, короткие треки играют важную роль для анализа событий с рождением Λ^0 -гиперонов. Пион, образованный при распаде Λ^0 -частицы, имеет меньший импульс чем протон, и часто (приблизительно в 50% случаев), проходит только через переднюю часть спектрометра и пропорциональные камеры, после чего из-за сильного отклонения магнитным полем "вылетает" из установки и его трек может быть реконструирован только с использованием МС. Важно отметить, что вклад коротких треков детектируемых МС, становится еще более существенным при изучении других процессов, в которые вовлечены частицы более массивные, чем Λ -гипероны.

Глава 5. Исследование процессов старения детекторов частиц, работающих в интенсивных полях излучений

Сегодня, в эпоху Большого Адронного Коллайдера (LHC) радиационная стойкость стала чрезвычайно важной рабочей характеристикой газоразрядного детектора, сопоставимой по важности с его эффективностью, быстродействием и пространственным разрешением. Это обусловлено тем, что радиационная стойкость современных детекторов должна быть, по крайней мере, на порядок выше величины, достигнутой в ранее выполненных экспериментах. Таким образом, исследование эффектов старения этих новых детекторов является принципиально важным и своевременным.

В этой главе анализируется опыт создания радиационно-стойких детекторов, накопленный нами в ходе создания и исследования различных типов газоразрядных детекторов для таких экспериментов, как ATLAS, CMS, LHCb в ЦЕРНе (Швейцария) за 1996-2004годы. На основании этого опыта была предложена и реализована методика проведения исследований (и оптимизации) радиационных свойств газоразрядных детекторов путем их «быстрого старения» и экстраполяции полученных результатов на параметры детекторов при обычной (в десятки раз более низкой) скорости набора дозы облучения. Реализация подобного подхода позволяет оптимизировать радиационную стойкость детекторов на этапе их проектирования и исследования.

В работе анализируются результаты исследований свойств различных типов детекторов при их работе с различными газовыми смесями, обсуждаются результаты исследования влияния пространственного заряда на величину коэффициента газового усиления (КГУ) детектора при осуществлении ускоренного старения современных газовых детекторов находящегося в радиационных полях различной плотности. Анализируются особенности измерения КГУ для газовых смесей, в которых возникает стримерный разряд и т.д. [31-33].

5.1. Применение ядерно-физических методов для исследования процессов старения детекторов.

Впервые в мировой практике нами был успешно применен метод ядерных реакций (метод NRA) для исследования развития процессов старения детекторов путем анализа распределения концентрационных профилей легких элементов по глубине анодных проволок диаметром от 20 до 50 микрон, которые предполагалось применить для различных детекторов в ЦЕРНе в экспериментах CMS, ATLAS, LHCb и т.д. Принципиально важным достижением было то, что метод позволил осуществлять количественную оценку распределения элементов, приходящих из газовой лавины (кислород, углерод, азот, фтор и т.д.) на электроды детектора, как по их поверхности, так и по глубине.

Для детектирования и количественной оценки углерода, кислорода и азота в золотом покрытии анодных проволок в зависимости от глубины были использованы следующие ядерные реакции элементов с дейтронами и протонами:



где Q_R – энергия, выделяемая в реакции

Принципиальное преимущество метода NRA (по сравнению с другими) заключается в том, что детектируемые продукты ядерных реакций имеют энергию значительно выше энергии частиц, которые упруго рассеиваются назад от тяжелой матрицы основного вещества. Таким образом, сигналы от легких элементов детектируются в той области энергетического спектра, где фон практически отсутствует.

Методика применения метода ядерных реакций для исследования развития процессов старения детекторов была реализована и отработана на электростатическом ускорителе ПИЯФ РАН с максимальной энергией частиц 1.7 МэВ. Полученные нами экспериментальные результаты, ясно демонстрирующие высокую эффективность применения метода ядерных реакций для исследования процессов старения детекторов, представлены в работах [34-37].

Разработан метод NRA, позволивший при исследовании радиационной стойкости детекторов:

- детектировать и проводить количественный анализ всех лёгких элементов (кислород, углерод, фтор, азот), которые приходят из газовых смесей, применяемых в газонаполненных детекторах, на электроды и концентрируются в материале электродов.

- однозначно продемонстрировать ключевую роль кислорода в механизме развития процессов старения (распухания) проволок;

- детектировать заранее непредсказуемые распределения кислорода и других легких элементов вдоль проволоочки (см., например, [36]).

5.2. Эффект распухания анодных проволок – принципиально новый механизм старения газоразрядных детекторов частиц при больших дозах облучения.

Обычно эффекты старения вызывают деградацию поверхности как анодных, так и катодных электродов, которая возникает в виде «осадков». Эти отложения, как правило, представляют собой какие-то виды полимеров или, в отдельных случаях, могут быть элементарным углеродом.*

Несколько лет тому назад принципиально новый механизм старения анодной проволоки – распухание проволоки при больших накопленных дозах, был обнаружен и описан в ходе исследований [38-40], выполненных Отделом трековых детекторов ПИЯФ РАН. Это было новое явление, вызывающее существенное ухудшение параметров газовых детекторов. Проведенные исследования показали, что принципиальное различие между обнаруженным явлением «распухания» анодной проволоки и хорошо известным полимеризационным механизмом старения, связано с тем, что при разбухании золотое покрытие разрушается под влиянием сил, действующих изнутри проволоочки. В результате такого процесса диаметр проволоки увеличивается. На Рис.18 представлены результаты SEM/XEM анализа, полученные для различных для различных координат вдоль проволоочки после накопления заряда $Q = 9$ Кулон/см.

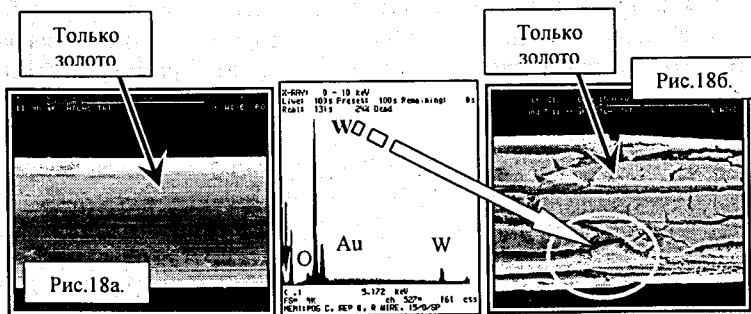


Рис.18. Эффект распухания анодной проволоочки. Рис.18а. Край проволоочки. Необлученная зона, $X = -14$ см. Диаметр – 35мкм.

Рис.18б. Центр проволоочки. Центр облученной зоны. Диаметр – 42мкм

Такой анализ проводился как в центре зоны облучения ($X = 0$ см), так и далеко за ее пределами со стороны входа газа ($X = -14$ см). Как можно видеть, золоченная поверхность проволоки вне зоны облучения остается гладкой, неповрежденной и без осадков. В центре же зоны облучения золотое покрытие разрушено и диаметр проволоки увеличился на 20% (с 35мкм до 42мкм). Режим облучения: интенсивность – 1.7 мкА/см и доза – 9 Кл/см на проволоку).

SEM/XEM анализы, сделанные в нескольких точках вдоль проволоки, показывают, что осадки, обнаруженные за пределами зоны облучения, содер-

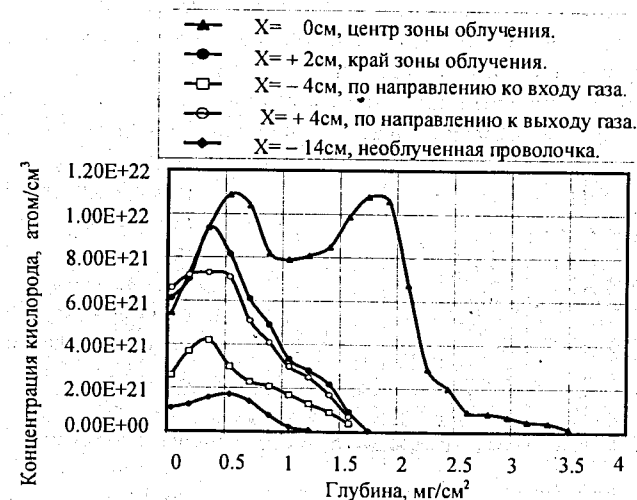


Рис.19. Распределение концентрации кислорода как функция глубины золотого покрытия в различных точках вдоль анодной проволоочки. Ориентировочный масштаб: 1 мг/см^2 соответствует 0,5мкм по толщине.

жат интенсивные пики вольфрама и кислорода, а также следы фтора.

Чтобы получить количественную оценку распределения легких элементов как в глубину золотого покрытия (Рис.19), так вдоль поверхности проволоочки (Рис.20) мы применили метод ядерных реакций (NRA). Из данных, представленных на Рис.20 видно, что существует прямая корреляция между диаметром анодной проволоки и распределением концентрации кислорода вдоль проволоочки. Причем, положения и формы пиков имеют сильную корреляцию и хорошо согласуются с положением пучка.

Используя метод NRA, мы видим, что пиковая концентрация кислорода, собранного в центре зоны облучения увеличилась более, чем в 25 раз, по сравнению с необлученной проволокой. Далее, количество кислорода в проволоке, измеренное вблизи выходного отверстия газа, оказалось существенно больше, чем количество кислорода, измеренное вблизи входного отверстия газа. Это хорошо согласуется с результатами, полученными при SEM/XEM анализе.

Главная идея, объясняющая эффект распухания, заключается в следующем. Кислород проникает через имеющиеся/образующиеся поры в золотом покрытии и, как мы предполагаем, окисляет под ним вольфрам. Мы не можем исключить, что при этом на этом же уровне могут образовываться и другие соединения. В результате, все это вместе взятое приводит к значительному локальному увеличению объема вольфрамовых соединений внутри проволоки, что и создает внутри проволоки силы, вызывающие разрыв золотого покрытия.

Представленный в диссертации широкий спектр экспериментальных данных позволяет утверждать, что обнаруженный нами новый механизм старения – распухание анодных проволочек – не является уникальным явлением, и оно проявляется при работе детекторов в интенсивных радиационных полях. Применение различных газовых смесей и типов анодных проволочек изменяет

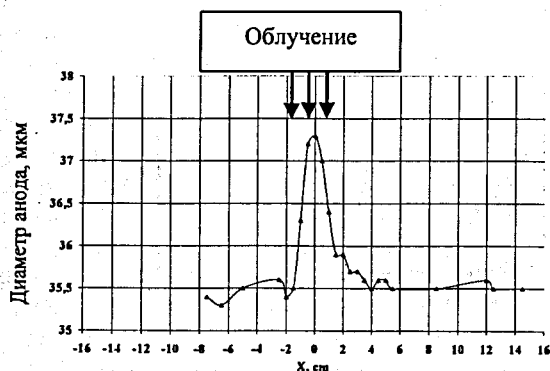


Рис.20а. Эффект распухания анодной проволочки. Зависимость диаметра проволочки от координаты вдоль проволочки.

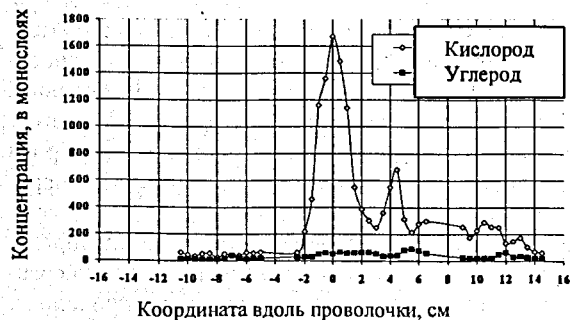
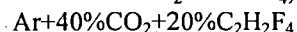
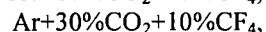
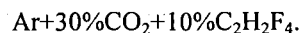


Рис.20б. Распределения концентрации кислорода и углерода вдоль проволочки, полученные методом NRA.

только масштаб проявления обнаруженного явления. Детальное изучение процессов старения анодных проволочек, изготовленных из золоченого вольфрама диаметром 25, 30 и 35 микрон, было выполнено при различных величинах накопленных зарядов вплоть до 9Кл/см. В исследованиях использовались различные газовые смеси:



и



Впервые экспериментально обнаружено, что при определенных условиях плазмохимические процессы, вызывающие «распухание» проволочки, могут идти столь интенсивно, что вызывают выход значительного количества

вновь образованных химических соединений, содержащих кислород и вольфрам, изнутри проволочки на поверхность ее золотого покрытия, причем в значительном количестве за пределами зоны облучения (Рис.21).

Анализ полученных результатов показал, что, несмотря на существенное различие между исследованными эффектами старения, природа сил, вызывающих старение проволочек, одинакова: распухание материала проволочки порождает внутри анодной проволочки силы, которые приводят к образованию трещин в золотом покрытии.

Проведенный анализ экспериментальных данных позволил нам предло-

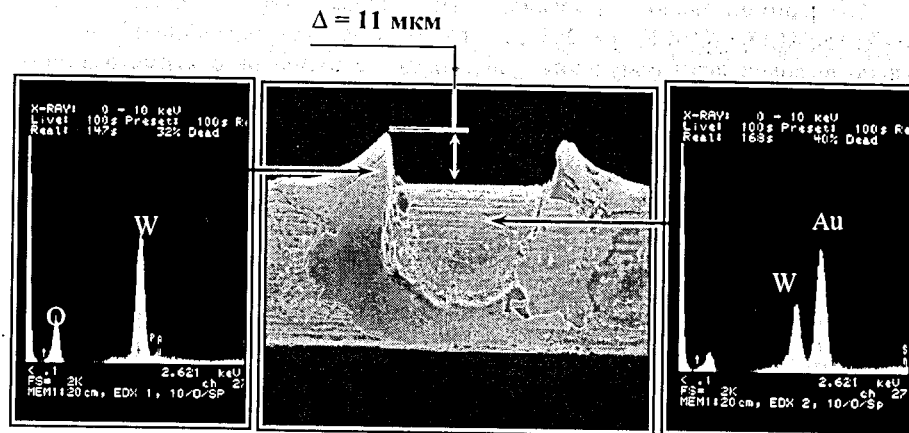


Рис.21. Типичные результаты обследования анодной проволочки методом SEM/XEM в точке, расположенной вблизи зоны облучения со стороны выхода газового потока. Очень толстый слой (11мкм) окиси вольфрама хорошо наблюдается поверх золотого покрытия проволочки. Диаметр проволочки – 30мкм.

жить модель возникновения и развития «распухания» анодной проволочки, в которой рассмотрена взаимосвязь между главными факторами, вызывающими распухание и, как следствие, старение детектора.

5.3. Исследование процессов старения больших мюонных камер для эксперимента CMS в ЦЕРНе.

Мюонная система в эксперименте CMS состоит из 540 катодных стриповых камер (CSC) шести различных типов, самые большие из которых имеют размеры $3.4 \times 1.5 \text{ м}^2$. Все камеры изготавливались из семи трапециевидных катодных панелей, разделенных шестью зазорами величиной 1см, в центре которых располагались анодные проволочные электроды. Общая площадь, покрываемая камерами, составляет более 1000 м^2 (или 6000 м^2 , если каждую камеру считать отдельно), а общее число анодных проволочек превышает 2 миллиона.

Ясно, что нельзя было начинать производство такого гигантского объема камер без тщательного исследования и оптимизации их свойств и, в первую очередь, без гарантированного обеспечения необходимого времени их жизни в условиях реального эксперимента. В ходе работ были исследованы различные прототипы камер, которые были изготовлены с использованием именно тех материалов, которые предполагалось применить при производстве камер. В этих исследованиях использовались три различные газовые смеси 30%Ag+50%CO₂+20%CF₄, 30%Ag+70%CO₂, и 40%Ag+50%CO₂+10%CF₄ [41-42].

Экспериментально доказано, что применение газовой смеси 40%Ag+50%CO₂+10%CF₄ (и 20%CF₄ тоже) позволяет накапливать экстремально высокие дозы облучения – вплоть до 13 кулон на сантиметр длины анодной проволоки практически без заметного падения величины КГУ. Анализы поверхностей анодов и катодов после проведенных облучений показали, что газовые смеси, имеющие в своем составе CF₄, вызывают в камерах катодный тип старения. Задачей исследований с газовой смесью 30%Ag+70%CO₂ было подтвердить позитивную роль CF₄ в предотвращении старения анодных проволок. Полученные результаты показали, что отсутствие CF₄ принципиально изменило химию образования осадков и развития процессов полимеризации по сравнению с той, которую мы наблюдали для газовой смеси 30%Ag+50%CO₂+20%CF₄. В частности, в этом случае в камере развивался анодный тип старения, а время жизни уменьшается в десятки раз.

Автор выносит на защиту следующие результаты:

1. Разработан и создан полномасштабный детектор переходного излучения (ДПИ), который был успешно применен в серии экспериментов (E-715, E-761, E-781), проведенных на гиперонных пучках в Лаборатории им. Э.Ферми (Fermilab, USA) за период с 1981 по 1998годы.

1.1. Многомодульный ДПИ с рабочей апертурой 1,0×0,6м и малыми флуктуациями коэффициента газового усиления по площади (менее 12%) обеспечил рекордную режекцию пи-минус мезонов, которая составила $R_{\pi} \geq 1.8 \times 10^3$ при эффективности регистрации электронов $\epsilon_e \geq 99,7\%$. В ходе эксперимента E-715 были разработаны и реализованы алгоритмы работы ДПИ в составе экспериментальной установки, обеспечивающие максимально высокий коэффициент режекции π^- - мезонов. Эти алгоритмы были успешно применены во всех последующих экспериментах с использованием ДПИ. Применение ДПИ в эксперименте E-715 позволило надежно выделить бета-распады поляризованных сигма-минус гиперонов с импульсом 250 ГэВ/с на фоне в 1000 раз более интенсивного канала распада $\Sigma^- \rightarrow \pi \pi^-$. Было показано, что вопреки имеющимся в то время экспериментальным данным, полученная величина электронной асимметрии в изучаемом распаде очень близка к предсказанной и составляет $\alpha_e = -0.53 \pm 0.14$.

1.2. Использование ДПИ в эксперименте E-761 позволило надежно выделить радиационный распад $\Sigma^+ \rightarrow p \gamma$ и исследовать его асимметрию на фоне в 400 раз более интенсивной реакции $\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0 \rightarrow p 2\gamma$, кинематика которой подобна кинематике исследуемого процесса, а в конечном состоянии образуются те же частицы. В этом эксперименте ДПИ был применен в новом качестве: он являлся ключевым элементом фотонного калориметра и впервые использовался как гамма-детектор с высоким пространственным разрешением (FWHM \approx 2мм). В этом же эксперименте были получены новые данные по радиационным распадам, поляризации и магнитным моментам различных гиперонов, включая Ξ^- и Ω^- .

1.3. SELEX спектрометр (эксперимент E-781) был ориентирован на изучение широкого класса ядерных реакций, связанных с рождением очарованных барионов и их распадами. Структура спектрометра предусматривала возможность реконструкции двух вершин с хорошим пространственным и, соответственно, угловым разрешениями. Важнейшей особенностью спектрометра SELEX явилось наличие системы полной идентификации частиц, которая базировалась на созданной в ПИЯФ трековой системе содержащей два ДПИ (пучковый и электронный) и 26 пропорциональных камер. Только за последние несколько лет была получена серия совершенно новых физических результатов. Сюда входят: измерение выходов Λ_c , D_c , D^0 и D^+ на пучках Σ^- , π^- и p ; более точное измерение времени жизни Λ_c ; впервые был измерен зарядовый радиус Σ^- ; получены новые данные по поляризации гиперонов и т.д.

2. Для исследования эффектов каналирования и фокусирования протонов с энергией 1 ГэВ монокристаллами были разработаны и созданы две трековые системы на базе пропорциональных камер с различными методами съема информации, работающие совместно с детектором ионизационных потерь. Проведенный в диссертации анализ показал, что совместное использование этих двух методов (трековая система и детектор ионизационных потерь) значительно увеличивает надежность и качество получаемых результатов.

2.1. Высокое угловое разрешение экспериментальной установки позволило доказать возможность поворота пучка протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым монокристаллом на угол 11 мрад, а также разделить эффекты для различных кристаллографических плоскостей и оценить вероятность объемного захвата в режим каналирования для 1 ГэВ протонов в канал плоскости (111).

2.2. За счет предельно высокого пространственного разрешения ($\sigma \leq 50 \mu\text{m}$) камер, входящих в состав новой трековой системы, удалось экспериментально продемонстрировать эффект угловой фокусировки каналирующих протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым монокристаллом. В результате, в фокальной плоскости изогнутого кристалла был обнаружен узкий пик шириной 0.65 ± 0.05 мм, что соответствует угловой расходимости, определяемой

углом Линдхарда (0.12 мрад) для данной кристаллографической плоскости (111).

3. Разработан и создан торцевой детектор (FTC) на базе дрейфовых камер для экспериментальной установки L3 (ЦЕРН, Швейцария). Детектор FTC предназначался для регистрации координат частиц в диапазонах полярных углов $14^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$ и $145^\circ \leq \theta \leq 166^\circ$, которые не перекрываются Z-камерами центрального детектора TES.

3.1. В детекторе FTC с каждой из 320 анодных проволочек регистрировались две координаты частицы. Первая координата измерялась по времени дрейфа и обеспечивала пространственное и угловое разрешения FTC на уровне: не хуже $\sigma \leq 150$ мкм и $\Delta\theta \leq 10$ мрад, соответственно. Вторая координата измерялась методом деления заряда. Впервые на низкорезистивной анодной проволочке (100 ом/метр) было реализовано измерение координат треков частиц методом деления заряда с практически предельным для данного метода пространственным разрешением ($\sigma_x \approx 0,01L$, где L - длина проволочки).

3.2. Разработан и реализован алгоритм оптимизации всего комплекса рабочих параметров дрейфовых камер в условиях ограниченного пространства для их размещения. Показано, что линейность зависимости координаты трека частицы от времени дрейфа (Y-T) является единственным физическим критерием, включающим в себя весь комплекс факторов, влияющих на работу дрейфовой камеры FTC. Одним из практических результатов применения предложенного метода, явились то, что были достигнуты практически одинаковые условия дрейфа электронов для всех дрейфовых ячеек детектора, что значительно упростило процедуру его калибровки. При этом максимальная погрешность в определении координаты трека частицы, вызванная нелинейностью зависимости «координата-время», не превысила ≤ 70 мкм.

3.3. Разработан и реализован в конструкции детектора новый метод, позволяющий одновременно формировать в дрейфовом промежутке однородное электрическое поле и защищать его от разрушающего воздействия внешних заземленных экранов. Результирующая неоднородность электрического поля в дрейфовом промежутке модуля FTC составила $|\Delta E/E| \leq 0,5\%$, что обеспечило постоянство дрейфовой скорости электронов на уровне $|\Delta V_{др}/V_{др}| < 0,08\%$.

3.4. Детектор более 10 лет успешно участвовал в наборе статистики и использовался в анализе данных на ускорителе LEP в ЦЕРНе при изучении физических процессов с участием электронов, фотонов, мюонов и адронов, рождающихся в e^+e^- - столкновениях при энергиях до $\sqrt{s} = 200$ ГэВ. Данные, получаемые непосредственно с детектора FTC, оказались принципиально важным и при определении знака заряда частиц в распаде $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ и при исследовании предсказаний квантовой электродинамики для реакции $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$.

4. Разработан и создан на базе пропорциональных камер координатный детектор низкоэнергичных частиц (МС-детектор), более 10 лет успешно работавший в составе экспериментальной установки HERMES (DESY, Германия).

4.1. Размещение МС-камер внутри спектрометрического магнита экспериментальной установки позволило реконструировать многотрековые события и, что принципиально важно, дало возможность осуществлять импульсный анализ низкоэнергичных продуктов распада, которые вообще не могли быть зарегистрированы без информации, поступающей от МС камер. Импульсное и угловое разрешение для этих событий (короткие треки) оказалось почти таким же, как и для длинных треков, прошедших через всю трековую систему HERMES. Способность реконструировать короткие треки сделала МС-детектор принципиально важным прибором при изучении полуинклюзивных каналов реакций. В частности, это дало возможность изучать распады барионов, таких как Λ^0 .

4.2. Предложен и успешно реализован метод, позволивший использовать в конструкции МС-камер нежесткие наружные рамы. Это позволило максимально расширить кинематическую область анализа данных в установке HERMES.

5. Разработана и реализована методология исследования и оптимизации радиационной стойкости детекторов частиц, позволяющая анализировать воздействие как отдельных факторов (состав газа, материал электродов, условия облучения, скорость продува газа и т.д.), так и конструкции детектора в целом на его радиационную стойкость. Проведен широкий комплекс исследований по изучению радиационной стойкости детекторов частиц, которая в эпоху LHC стала ключевым параметром детекторов.

5.1. Предложено и продемонстрировано, что метод ядерных реакций является очень эффективным инструментом при исследовании механизмов развития радиационной стойкости детекторов. Впервые в мировой практике использован метод ядерных реакций для количественных измерений распределения легких элементов (кислород, углерод, азот), входящих из газовой лавины на анодную проволочку вдоль ее поверхности, а также проследить динамику движения этих элементов в глубину проволочки и их обратное движение в составе новых химических соединений на поверхность проволочки.

5.2. Впервые обнаружен и исследован принципиально новый механизм старения анодных проволочек, который назвали - «эффектом распухания» проволочек.

5.3. Принципиальным отличием обнаруженного «эффекта распухания» от ранее известных «полимеризационных» механизмов старения состоит в том, что силы, вызывающие деформацию анодной проволочки, развиваются внутри проволочки, разрывая её золотое покрытие изнутри.

5.4. Экспериментально было доказано, что кислород играет ключевую роль в развитии процесса старения при больших накопленных дозах облуче-

ния. Показано, что существует прямая корреляция между величиной диаметра проволоки и распределением концентрации кислорода вдоль проволоки.

5.5. Впервые экспериментально обнаружено, что при определенных условиях плазмохимические процессы, вызывающие «распухание» проволоки, могут идти столь интенсивно, что вызывают выход значительного количества вновь образованных химических соединений, содержащих кислород и вольфрам, изнутри проволоки на поверхность ее золотого покрытия.

5.6. Проведены детальные исследования процессов развития старения прототипов «мюонных камер» для установки CMS в ЦЕРНе.

5.6.1. Эксперименты показали, что применение газовой смеси $40\%Ar+50\%CO_2+10\%CF_4$ позволяет накапливать экстремально высокие дозы облучения – вплоть до 13 кулон на сантиметр длины анодной проволоки практически без заметного падения величины КГУ.

5.6.2. Найденная газовая смесь оказалась настолько эффективной, что практически полностью блокировала экстремально негативное влияние паров кремнийсодержащих материалов, применяемых в технологии изготовления детекторов частиц, на их работу. Экспериментально было доказано, что ключевую роль в механизме блокирования играет фреон CF_4 . В частности, при его отсутствии в составе газовой смеси, камера выходила полностью из строя уже при накопленной дозе менее 0.1 кулона/см длины анодной проволоки. Причиной этого явилось интенсивное оседание кремнийсодержащих осадков на анодные проволоки.

5.6.3. Получены результаты были реализованы в финальной конструкции полномасштабных камер, что позволило гарантировать их надежную работу в течение ~30 лет в условиях номинальной светимости ускорителя ЛНС

6. Суммируя все вышесказанной, необходимо отметить, что проведенные исследования и разработки создали основу для создания в ПИЯФ широкого спектра экспериментальных установок на основе пропорциональных и дрейфовых камер с различными типами съема информации (по-канальный съем; метод деления заряда; метод измерения времени дрейфа; съем информации на линию задержки; катодный съем информации и т.д.). Эти детекторы надежно работали (и продолжают работать) практически во всех ядерно-физических экспериментах, проводимых ПИЯФ в области физики высоких энергий, как в России, так и в международных научных центрах в течении последних 25 лет.

По теме диссертации опубликованы следующие работы

1. В. А. Андреев, А. А. Воробьев, ... А.Г.Крившич, В. А. Щегельский, Детектор переходного излучения электронов в эксперименте по измерению асимметрии в β -распаде поляризованных S_{-} -гиперонов, Препринт ЛИЯФ АН СССР № 1186 (апрель 1986).

2. В.А. Андреев, Г.Е. Гаврилов, А.Г. Крившич, С.К. Патричев и др., "Пропорциональные камеры с высокой однородностью коэффициента газового усиления для детектора переходного

излучения", Материалы международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам, Дубна, (189–193) 1988.

3. V.T.Grachev, A.G.Krivshich, V.A.Schegelsky, N.N.Smirnov, N.K.Terentyev, A.A.Vorobyov, P.S.Cooper, J. Lach and M.Foucher, Transition radiation detectors in hyperon experiments at Fermilab, Proceedings of the Symposium on Particle Identification at High Luminosity Hadron Colliders, FNAL, Batavia, Illinois, April 5-7, 1989, 415-433

4. P.S.Cooper, ... E.Jastrazemski, A.Krivshich, ... A.Vorobyov, Fermilab proposal 761, An electroweak enigma : hyperon radiative decays, April 3, 1985.

5. R.Edelstein, ... A.Krivshich, ... P.S.Cooper, Fermilab proposal 781, A proposal to construct SELEX – Segmented Large-X baryon spectrometer, November 8, 1987.

6. A.Krivshich, Efficiency of PNPI proportional chambers under the real beam conditions of E-781, H-note 742, June 1995, FNAL

7. V.Maleev, N.Bondar, A.Krivshich, S.Patrichiev, N.Terentyev, Description and test results for DPWC and TRD in E-781, H-note 747, Sept.1995, FNAL.

8. J.Russ, G.Alkhozov, ... A.Krivshich, ..., et al. Int. Conf. HEP-2000, "Recent results from SELEX" Osaka 2000, High Energy Physics, vol.2, 820-821"; Fermilab-Conf-00-252E.

9. F.G.Garcia, G.Alkhozov, ... A.Krivshich, ..., et al. Hadronic production of Lambda C from 600-GeV/c pi-, sigma-, and p- beams, Fermilab-Pub-01-258E, Sep. 2001, 6pp, Phys.Lett.B528: 49-57,2002.

10. I.Eschrich, H.Kruger, J.Simon, ... A.Krivshich, ..., et al., "Measurements of the sigma-charge radius by sigma-electron elastic scattering", Phys. Lett. B522 (2001) 233-239

11. U.Dersch, N.Akchurin, ... A.Krivshich, ..., et al. Total cross-section measurements with pi-, sigma-, and protons on nuclei and nucleons around 600-GeV/c, Nuclear Physics 579 (2000) 277-312.

12. M.Matson, G.Alkhozov, ... A.Krivshich, ..., et al., First observation of the doubly charmed baryon Ξ_{CC}^{++} , Phys.Rev.Letter. 89 (2002) 112001.

13. S.Y.Jun, N.Akchurin, ... A.Krivshich, ..., et al., "Observation of the Cabibbo-suppressed decay $\Xi^+ \rightarrow pK^+\pi^+$ " Phys.Rev.Letter. vol.84, num.9 (2000) 1857-1861.

14. A.Kushnirenko, G.Alkhozov, ... A.Krivshich, ..., et al., "Precision measurements of the Λ_C^+ and D^0 lifetimes", Phys.Rev.Letter. vol.86, num.23 (2001) 5243-5246.

15. В.А.Андреев, А.А.Воробьев, ... А.Г.Крившич, ... В.М.Самсонов, ... О.И.Сумбаев. Проект эксперимента по обнаружению объемного захвата протонов в режим канализования изогнутым кристаллом. Предложение эксперимента. Л., (1980) 1-31.

16. В.А.Андреев, А.А.Воробьев, ... А.Г.Крившич, ... В.М.Самсонов, ... О.И.Сумбаев. Установка для исследования канализования протонов с энергией 1 ГэВ. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика, выпуск 4 (18), 1981, 96-99.

17. В.А.Андреев, ... А.Г.Крившич, ... В.М.Самсонов, ... В.А.Щегельский, Экспериментальное обнаружение объемного захвата протонов в режим канализования изогнутым монокристаллом. Письма в ЖЭТФ 36 (1982) 340-343.

18. В.А.Андреев, ... А.Г.Крившич, ... В.М.Самсонов, ... В.В.Сулимов. О выполнении принципа обратимости для процесса «объемного» захвата частиц в режим канализования в изогнутом кристалле. Письма в ЖЭТФ 44 (1986) 101-103.

19. В.А.Андреев, ... А.Г.Крившич, ... В.М.Самсонов, ... В.А.Щегельский. Фокусировка пучка 1-ГэВ-ных протонов при объемном захвате в режим канализования изогнутым монокристаллом. Письма в ЖЭТФ (1984) 39, в.2, 58-61.

20. В.А.Андреев, ... А.Г.Крившич, ... В.М.Самсонов, ... В.А.Щегельский. Пространственная фокусировка 1 ГэВ-ных протонов изогнутым монокристаллом. Письма в ЖЭТФ 41 (1985) 408.

21. В.А.Андреев, ... А.Г.Крившич, ... В.М.Самсонов. Прецизионная пропорциональная камера для исследования канализования частиц высоких энергий в изогнутых кристаллах, Сборник «Методические и прикладные работы ЛИЯФ», (1988) 224-226. Н.Ф.Бондарь, А.Г.Крившич,

- В.П.Малеев, Пространственное разрешение пропорциональной камеры с катодным съемом информации, препринт ПИЯФ NP-47-1993 1916.
22. G. Alkhazov, ... A. Krivshich et. al.. Forward tracking chamber (FTC) in L3 detector. Part I. General description. PNPI preprint EP-23-1996, 2115.
23. V. Andreev, G. Gavrilo, A. Krivshich, et al.. Design principles of the end cap drift chambers in the L3 experiment. Nucl. Instrum. and Methods A430(1999) 245-259.
24. А.В. Андреев, Г.Е. Гаврилов, А.Г.Крившич, Воздействие внешних экранов на коэффициенты газового усиления в дрейфовых камерах детектора FTC. Препринт ПИЯФ N1797, май 1992 г.
25. G.Gavrilo, A.Krivshych and M.Jarmarkin. Influence of external grounded screens on electric field structure in a drift chamber. Nucl. Instrum. and Methods A356(1995) 189-195.
26. А.В. Андреев, Г.Е. Гаврилов, А.Г.Крившич, et al.. Минимизация тока утечки в дрейфовых камерах. Препринт ПИЯФ N1842, декабрь 1992 г.
27. В.А. Андреев,, А.Г.Крившич и др. FTC - детектор в установке L3 (ЦЕРН). сборник работ ПИЯФ "Основные результаты исследований 1990-1991 г. (оперативные результаты)", стр. 190-192.
28. А.А. Воробёв, А.Г. Крившич, В.А. Щегельский. Исследования на большом электрон-позитронном коллайдере ЦЕРНа – эксперимент L3. Сборник ПИЯФ. "XXV Основные направления научной деятельности ОФВЭ". 1996 год, стр. 67-68.
29. K. Ackerstaff... A. Krivchitch... H.Zohrabian, the HERMES Spectrometer, Nucl. Instr. and Meth. A 417 (1998) 230-265.
30. V. Andreev ... A. Krivchitch, ... G.M. Urciuoli, Multiwire proportional chambers in the HERMES experiment, Nucl. Instr. and Meth. A 465 (2001) 482-497.
31. T. Ferguson, A. Krivchitch and V. Maleev, Gas gain and space charge effects in aging tests of gaseous detectors, Nucl. Inst. and Meth. A 515 (2003) 283-287.
32. G. Gavrilo, A. Krivchitch,, Aging investigation of ATLAS TRT straws, Preprint PNPI, No 2328, EP-43-1999
33. G. Gavrilo, A. Krivchitch, E. Kuznetsova, V.Maleev, Space distribution of streamers in straw tubes, Inst. and Meth. A 515 (2003) 278-282.
34. G. Gavrilo, A. Krivchitch and V. Lebedev, Application of nuclear reaction analysis for aging investigations of detectors, Nucl. Inst. and Meth. A 515 (2003) 108-117.
35. A.G. Krivchitch and V.M. Lebedev, Application of nuclear reaction analysis for the fluorine content measurements under the aging investigations of gas-filled particle detectors, , Nucl. Instr. and Meth. 581 (2007) 167-170.
36. G. Gavrilo, A. Krivchitch,, Aging investigation of straw drift tubes using nuclear reaction analysis, Nucl. Inst. and Meth. A 478 (2002) 259-262.
37. В.М.Лебедев, А.Г.Крившич, В.А.Смолин, Исследование старения газоразрядных детекторов частиц методом ядерных реакций, Известия РАН,серия физическая, 2007, том 71, №9, 1360-1366. В.М.Лебедев, А.Г.Крившич, В.А.Смолин, Исследование старения газоразрядных детекторов частиц методом ядерных реакций, Вопросы атомной науки и техники, выпуск 2, Москва (2006) 48-55.
38. T.Ferguson, G.Gavrilo, A.Egorov, A.Krivchitch, et al., "Anode wire swelling - a possible phenomenon in the anode wire aging under high accumulated dose", Nucl. Inst. and Meth. A 483 (2002) 698-712.
39. T. Ferguson, G. Gavrilo, V. Gratchev, A. Krivchitch, et al., Swelling phenomena in the anode wire aging under the high accumulated dose, Nucl. Instr. and Meth. 515 (2003) 266-277.
40. T.Ferguson, G.Gavrilo, A.Krivchitch, et al., The effect of oxygen on anode wire swelling under high-accumulated dose, Nucl. Instr. and Meth. 478 (2002) 254-258.
41. T. Ferguson, G. Gavrilo, A. Korytov, A. Krivchitch, et al., Aging studies of CMS muon chamber prototypes, Nucl. Inst. and Meth. A 488 (2002) 240-257.
42. D.Acosta, A. Krivshich, V. Yarba, L. Zhou and Z. Zhu et al., Aging tests of fullscale CMS muon cathode strip chambers, Nucl. Inst. and Meth. A 515 (2003) 226-233.