

C-324

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-96-2

На правах рукописи
УДК 539.1.07
539.17

СЕРДЮК
Валерий Зороастрович

ТРЕКОВАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ «ИСТРА-М»
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РЕДКИХ РАСПАДОВ К-МЕЗОНОВ

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

Сердюк

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Б.Ж. Залиханов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,

кандидат физико-математических наук,

Ю.В. Заневский

А.С. Кожин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт Атомной Энергии им. Курчатова (г. Москва)

Защита диссертации состоится " 23 " февраль 1996 года в
 часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна Московской области. С диссертацией можно
ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " 23 " января 1996г.

Ученый секретарь Специализированного совета,
доктор физико-математических наук

Ю.А. Батусов

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

В 1975 году Институтом Ядерных Исследований АН СССР была инициирована программа исследования редких распадов π и К-мезонов на ускорителе У-70 в ИФВЭ. Установка ("ИСТРА"), адекватная решению этой задачи, была создана и запущена на канале адронов с энергией ≈ 25 Гэв на У-70. К середине восьмидесятых годов на этой установке была получена серия новых результатов по распадам К-мезонов, большая часть из которых была представлена на международных конференциях и вошла в таблицы элементарных частиц.

Дальнейшее развитие этой программы потребовало существенной модернизации установки, которая была проведена по следующим направлениям:

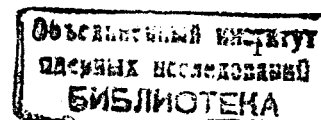
- совершенствование трековой системы вторичных частиц на пути повышения ее точностных характеристик, а также многотрековости и акцептанса;
- создание прецизионного широкоапертурного магнитного спектрометра вторичных частиц на основе газовых дрейфовых детекторов;
- создание быстродействующего координатного детектора с малым количеством вещества для работы в пучке интенсивностью 10^7 сек $^{-1}$;
- создание адронного калориметра и мюонного идентификатора;
- совершенствование детекторов электронов и гамма-квантов;
- создание охранной системы черенковских счетчиков из свинцового стекла для подавления фоновых процессов с гамма-квантами и электронами в конечном состоянии, сопровождающих редкие распады;
- развитие триггерной системы и системы приема данных, с целью повышения ее быстродействия и эффективности.

Целью диссертационной работы является:

- разработка технологической оснастки для изготовления дрейфовых камер с распределенным потенциалом;
- изготовление 8 однокоординатных плоскостей дрейфовых камер с распределенным потенциалом эффективной площадью 480×800 мм 2 и длиной дрейфового промежутка 20 мм;
- разработка новой технологии изготовления дрейфовых камер. Изготовление четырех дуплетов камер такого типа размерами 500×500 мм 2 и 700×700 мм 2 для установки "ИСТРА-М".
- создание новой трековой системы заряженных частиц для магнитного спектрометра установки "ИСТРА-М" по изучению редких распадов K^- -мезонов и исследование ее характеристик;
- разработка вершинного детектора, состоящего из системы дрейфовых камер и узкоазорных быстродействующих пучковых камер, способного работать в первичном пучке, интенсивностью $\approx 10^7$ сек $^{-1}$;

Практическая ценность и научная новизна работы.

В диссертации решена проблема создания вершинного детектора для эксперимента по изучению редких распадов заряженных K^- -мезонов на легу на ускорителе У-70



(Протвино) при интенсивности первичного пучка не менее $2 \times 10^7 \text{сек}^{-1}$. Разработана технология изготовления дрейфовых камер с линейно распределенным потенциалом, предназначенных для регистрации вторичных заряженных частиц в установке. Предложен и внедрен в эксперименте новый метод создания нечувствительной зоны в области интенсивного пучка в проволочных камерах, предназначенных для регистрации вторичных продуктов от взаимодействий или распадов. Разработана новая - безрамочная технология изготовления дрейфовых камер, предназначенных как для восстановления вершины распада К-мезона и импульсного анализа продуктов распада, так и для выработки триггера на заряженные частицы. Проведены исследования характеристик разработанных детекторов в лабораторных условиях и в реальных условиях на ускорителе. Проведен анализ временных спектров в дрейфовых камерах, в результате которого, выявлены систематические ошибки, влияющие на их точностные характеристики. Доказана необходимость учета индивидуальной координаты каждой сигнальной проволочки в результате процедуры извлечения дрейфовой функции. Демонстрируется работоспособность созданной трековой системы на основе восстановления распадов К-мезонов в установке "ИСТРА-М". Приводятся точностные характеристики установки. Измерены векторные формфакторы $K_{\mu\pi}$ -распада.

Обобщенный в диссертации опыт разработки проволочных камер и создания трековых систем имеет практическую ценность при планировании и проведении экспериментов с магнитными спектрометрами на пучках высокой интенсивности.

Апробация работы и публикации. Диссертация написана на основе научных работ, выполненных с участием автора в ЛЯП ОИЯИ в период с 1985 по 1995 гг.

Основные результаты диссертации докладывались на Международном рабочем совещании "Физика на УНК" (Протвино, 1990)[3], на семинарах Лаборатории Ядерных Проблем [8] и ИФВЭ [10] а также опубликованы в журнале Nuclear Instruments and Methods [2,6] и материалах Рабочего совещания по Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ (Дубна, 1990)[1].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 96 страниц текста, включая 1 таблицу, 33 рисунка и список цитируемой литературы из 92 наименований.

0.1 Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, описана модернизированная установка "ИСТРА-М"; излагаются проблемы, поставленные и решенные в процессе ее модернизации. Сформулированы цели работы и описывается структура диссертации.

Первая глава

представляет собой краткий обзор, в котором изложена проблема создания проволочных камер для работы в пучках высокой интенсивности. Анализируются и формулируются основные требования при разработке таких детекторов и приводятся методы решения возникающих проблем.

Во второй главе описывается конструкция и некоторые параметры узкозонарных пучковых пропорциональных камер установки с малым количеством вещества, предназначенных для работы в пучке интенсивностью $\geq 10^7 \text{сек}^{-1}$. Камеры разработаны в принципиально новом технологическом подходе. Их назначение состоит в измерении импульса частиц пучка, а также (совместно с дрейфовыми камерами) в восстановлении вершины распада. Предложенный принцип позволил создать пучковый детектор с малым количеством вещества, приемлемый для эксперимента по изучению редких распадов К-мезонов при высокой интенсивности пучка.

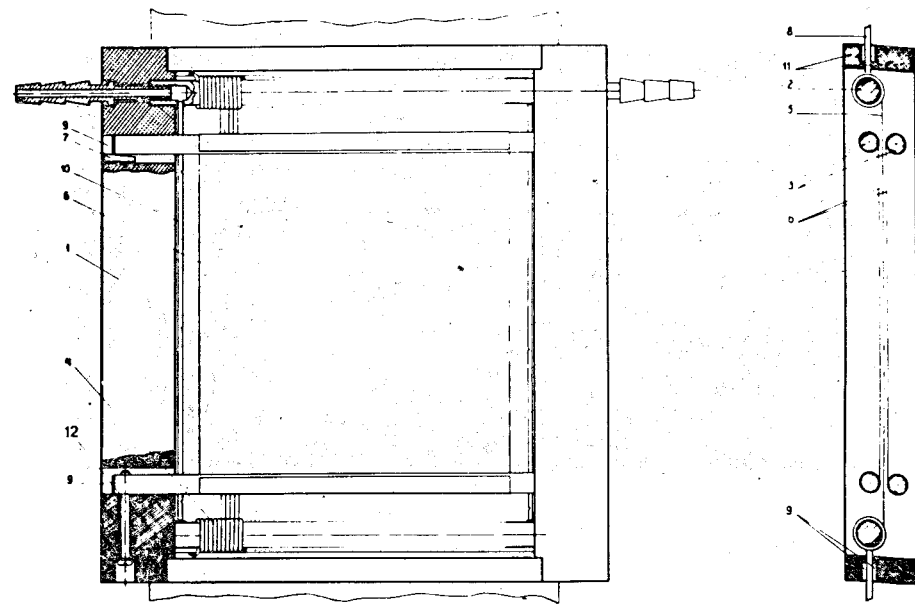


Рис. 0.1: Конструкция пучковой пропорциональной камеры

В отличие от традиционного подхода к изготовлению проволочных камер, в данном варианте отсутствует рамочная структура. Положение электродов определяется металлическими стержнями 2 и 3 (рис.1), изготовленными из калиброванного прутка промышленного изготовления, который обладает высокой однородностью по диаметру.

В технологии, реализован новый метод фиксации сигнальных проволок. На стержень 2 (рис.1) плотно, "виток к витку" наматывается спираль 4 из медной проволоки с изолирующим лаковым покрытием, в результате чего создается точная "гребенка" для намотки сигнальной плоскости с высокой ($\approx 1 \text{мкм}$) однородностью шага. В процессе намотки сигнальные проволоки укладываются в пазы спирали, чем гарантируется высокая точность шага и плоскостность сигнального электрода.

Для модернизированного варианта установки "ИСТРА-М" было изготовлена серия из шести однокоординатных модулей пучковых камер, имеющих следующие основные геометрические характеристики:

- Расстояние между анодными и катодными плоскостями $-1.5 \pm 0.005 \text{ мм}$
- Шаг анодных проволок $-1.1 \pm 0.001 \text{ мм}$
- Чувствительная площадь $-140 \times 130 \text{ мм}^2$
- Число анодных проволок -118
- Диаметр анодных проволок -0.02 мм
- Толщина катодных электродов (лаван + углеродный слой) -0.025 мм

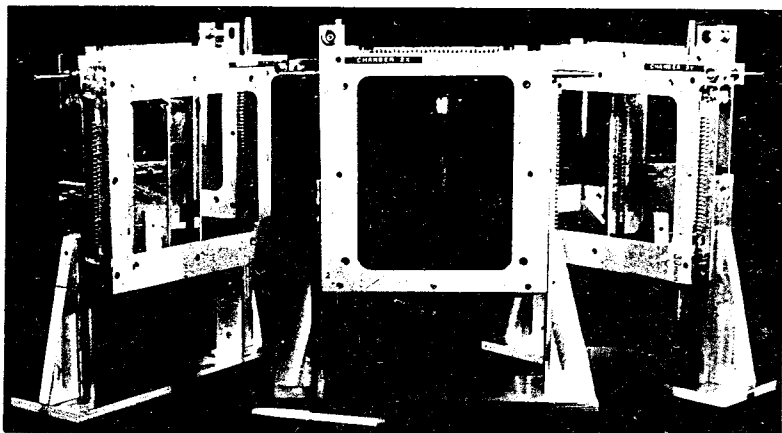


Рис. 0.2: Общий вид пучковых пропорциональных камер установки "ИСТРА-М"

- Поверхностное сопротивление катода - 400 Ом/см²

Общий вид пучковых пропорциональных камер установки "ИСТРА-М" показан на рис. 2. Геометрия расположения пропорциональных камер и мониторинговых счетчиков пучковой части установки представлена на рис.3. Две Y-плоскости камер были установлены перед пучковым магнитом для измерения угла входа заряженного K-мезона по основной компоненте отклонения в магнитном поле. За магнитом установлены два дуплета (X-Y), регистрирующие трек заряженной частицы в пучке.

Широкое плато (более киловольта) эффективности и устойчивый характер работы камеры в большом диапазоне изменения рабочего напряжения является результатом высокой точности межэлектродных расстояний, достигнутых путем применения нового технологического подхода, а также использованием газовой смеси CF₄+20% i-C₄H₁₀, обладающей хорошими гасящими свойствами и лавсана с углеродным покры-

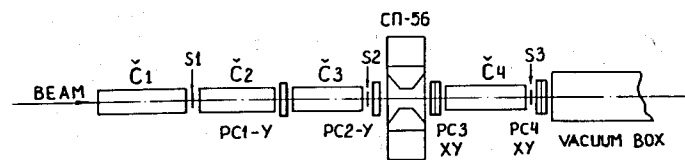


Рис. 0.3: Геометрия расположения пропорциональных камер и мониторинговых счетчиков пучковой части установки.

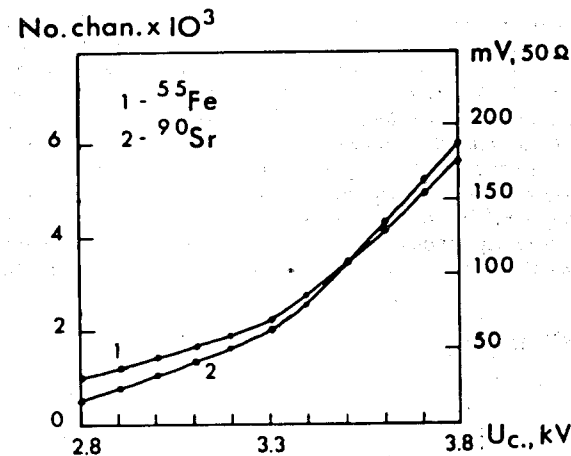


Рис. 0.4: Зависимость амплитуды сигналов от напряжения при облучении пучковой камеры источниками ⁹⁰Sr и ⁵⁵Fe

тием в качестве катода. Углерод обладает более высокой работой выхода по сравнению, с алюминием, который обычно используется как катодное покрытие в проволочных детекторах со сплошным катодом, а также способствует лучшей светоизолированности камеры, что в совокупности приводит к низкому уровню шумов детектора. В новой технологии, в отличие от рамочной структуры, отсутствует диэлектрик между высоковольтной и сигнальной плоскостями что исключает дополнительный источник шумов, обусловленный накоплением заряда и поляризацией диэлектрика. Конфигурация камеры и специфика ее работы, характеризуются расширенной областью лавинообразования и, следовательно, высоким (до 10⁷) значением коэффициента газового усиления без перехода в самогасящийся стримерный режим. Получение высокого усиления в камере возможно без использования магической смеси, для которой характерен высокий уровень старения. Расширенность области лавинообразования, свойственная лавинным счетчикам, подтверждается поведением амплитуды при облучении камеры источниками ⁹⁰Sr и ⁵⁵Fe (рис.4). Несмотря на большую разницу в первичной ионизации, производимой этими источниками (≈ в два раза), начиная с некоторого напряжения, амплитуда сигнала от ⁹⁰Sr сначала сравнивается, а затем превосходит амплитуду от ⁵⁵Fe.

Временной джиттер в камере изменяется от 8 нс (FWHM) при напряжении 2400 В до 5 нс при напряжении 2800 В. Дальнейшее увеличение напряжения практически не приводит к его изменению. Координатная точность с учетом многократного рассеяния в воздухе и веществе черенковских счетчиков составляет $\sigma = 320$ микрон, что соответствует ее теоретическому значению для камеры с данным шагом. Анализ разностей углов входа и выхода пучкового K-мезона из магнита при включенном и выключенном магнитном поле позволил впервые сделать оценку импульсного разброса пучка на установке, который составил $\Delta p/p = 4.5\%$ (FWHM) [6]. Мягкая компонента в пучке, исключалась при off-line обработке данных. Изучение загрузочных характеристик камер показало, что камеры не теряют эффективности при загрузках вплоть до максимально достижимой (2×10^7 сек⁻¹) на канале 4а ускорителя У-70. Эффективность не зависит также от местопрохождения частиц в камере. Наилучшая фокусировка пучка оказалась возможной при загрузке 6.5×10^6 сек⁻¹, при этом плот-

ность потока частиц составила $2.3 \times 10^6 \text{сек}^{-1} \text{см}^2$. В течение трех рабочих сеансов 1992 и 1994 года камеры продемонстрировали надежную работу. При интегральной нагрузке $\approx 10^{14} \text{частиц/см}^2$ каких-либо эффектов старения не наблюдалось.

В третьей главе описываются технологическая оснастка и дрейфовые камеры с линейно распределенным потенциалом. Приведены результаты исследования их характеристик методом теней в лабораторных условиях, а также в условиях эксперимента. Описана предложенная автором новая технология изготовления дрейфовых камер и конструкция камер такого типа, изготовленных и запущенных на установке "ИСТРА-М". Описывается метод создания нечувствительной зоны предложенный и внедренный на всех дрейфовых камерах установки, который обеспечил высокую эффективность регистрации вторичных частиц, вылетающих под малыми углами к оси пучка.

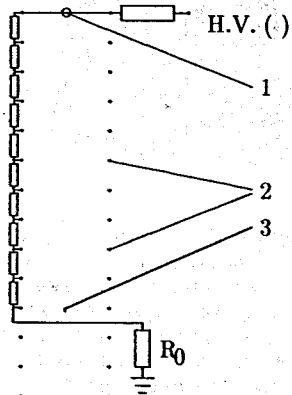
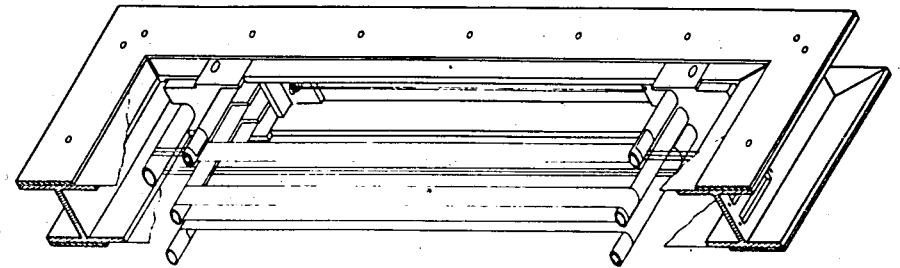


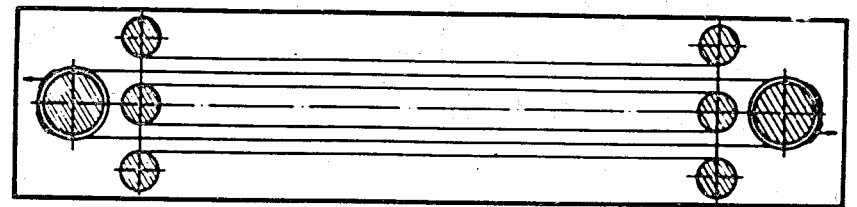
Рис. 0.5: Геометрия ячейки дрейфовой камеры с распределенным потенциалом и схема включения высокого напряжения

Геометрия дрейфовой ячейки камеры с распределенным потенциалом показана на рис.5. Полеформирующие плоскости 2 намотаны проволокой из бериллиевой бронзы диаметром 100 мкм с шагом 2 мм. Сигнальные проволоки 3 из золоченого вольфрама диаметром 20 мкм натянуты силой 20 г. Дрейфовая ячейка ограничена потенциальными проволоками из бериллиевой бронзы 1 диаметром 100 мкм. Расстояние между полеформирующими плоскостями в камере 6 мм, дрейфовый зазор - 20 мм. Резистор R_0 определяет разность потенциалов между сигнальной и ближайшей к ней полеформирующей проволокой, что в свою очередь определяет газовое усиление в камере. Соотношение между резистором R_0 и суммарным сопротивлением делителя напряжения задает дрейфовое поле в камере.

Благодаря способу создания электрического поля с помощью полеформирующих и потенциальных проволок, в ячейке камеры отсутствуют области со слабым полем. В основной области дрейфового промежутка поле однородно, увеличиваясь только вблизи сигнальной и потенциальной проволок. Таким образом, использование газовой смеси, для которой скорость дрейфа достигает насыщения уже при малых значениях электрического поля ($\approx 500-700 \text{ В/см}$), обеспечивает линейность дрейфовой характеристики и, следовательно, существенно упрощает процедуру калибровки ка-



а.



б.

Рис. 0.6: Схематический вид (а) и конструкция (б) дрейфовой камеры, изготовленной по новой технологии (в одном объеме две камеры).

мер такого типа.

Измерение скорости дрейфа, пространственной точности дрейфовой камеры, а также дрейфовая характеристика были проведены в лабораторных условиях с помощью источника электронов ^{90}Sr методом теней. Пространственная точность, полученная в этих измерениях с газовой смесью $80\% \text{Ar} + 20\% \text{C}_2\text{H}_4$, составила $\sigma_x = 120-150 \text{ мкм}$, скорость дрейфа - 50 мкм/нс при дрейфовом поле $E_{др} = 700 \text{ В/см}$. Плато эффективности дрейфовой камеры при пороге регистрации 2 микроампера, равно $\approx 300 \text{ В}$, обеспечивает надежную работу детектора в эксперименте.

С целью увеличения точности установки проволочных электродов и точности привязки плоскостей-партнеров друг к другу, уменьшения количества вещества в камере, а также обеспечения возможности включения трекового детектора в триггер на заряженные частицы, для установки "ИСТРА-М" была изготовлена серия дрейфовых камер в новом технологическом подходе. Каждый модуль представляет собой дуплет партнеров в едином газовом объеме, измеряющих одну и ту же координату с упрощенной геометрией камеры без потенциальных проволок (рис.6). Шаг сигнальных проволок в камерах равен 10.7 мм, диаметр проволоки - 20 мкм, зазор анод-катод 3 мм. Расстояние между сигнальными плоскостями в дуплете 21.3 мм.

Одним из основных элементов, к которому предъявляются высокие точностные требования (5-10 мкм), является фиксатор с пазами для металлических стержней

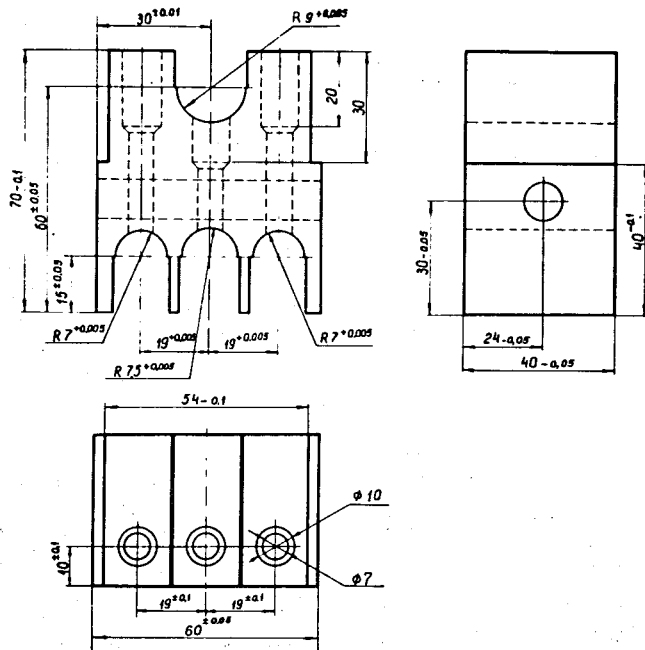


Рис. 0.7: Конструкция фиксатора дрейфовой камеры, изготовленной по новой технологии.

(рис.7), изготовленный из плексигласа. Положение стержней определяет положение электродов в камере.

С внутренней стороны фиксаторов в центральные пазы устанавливаются два стержня диаметром 15 мм для крепления центрального электрода, который служит одним из катодов как для одной так и для другой плоскости дуплета. Катоды изготавливаются из лавсана с углеродным покрытием толщиной 20 мкм.

С внешней стороны фиксаторов устанавливается стержень диаметром 20 мм с плотно намотанной на него по спирали медной проволокой диаметром 2 мм с изолирующим покрытием и ламелями изготовленными из фольгированного стеклотекстолита толщиной 100 мкм для пайки сигнальных проволок. Расстояние между ламелями равно шагу сигнальных проволок в камере. В процессе намотки сигнальные проволоки фиксируются в пазах между витками спирали, проходя по поверхности ламелей. В установке "ИСТРА-М" было задействовано 4 модуля камер такого типа (8 дрейфовых плоскостей). Два модуля эффективной площадью 500×500 мм² и два 700×700 мм².

Для обеспечения эффективной регистрации вторичных частиц, идущих под малыми углами к оси пучка в дрейфовых камерах установки "ИСТРА-М", был разработан новый метод создания нечувствительной зоны, основанный на гальваническом нанесении тонкого проводящего покрытия на сигнальную проволоку. Расчет, с учетом эмпирической зависимости 1-ого коэффициента Таунсенда от электрического поля $\alpha/P = Ae^{-\frac{P}{E/P}}$, показал, что увеличение диаметра проволоки в 3-4 раза (при исходном диаметре 20 мкм) практически полностью подавляет эффективность детектора в этой области. Покрытие сигнальной проволоки из золоченого вольфрама было про-

ведено никелем с помощью стандартного электролита.

При длине омертвляемой зоны в 5 см на сигнальной проволоке из золоченого вольфрама, оптимальный ток, обеспечивший хорошее качество покрытия составил 1,25 мА (средняя катодная плотность тока $\cong 1A/дм^2$). Время одного сеанса 2 часа, при этом результирующий диаметр проволоки равен 90 ± 5 мкм. Проверка работоспособности предложенного метода, проведенная на макете пропорциональной камеры размерами 128 × 128 мм², а затем на рабочем варианте дрейфовой камеры эффективной площадью 800-480 мм² показала, что неэффективность камеры в области прохождения пучка, равная $\approx 10^{-4}$, обеспечивает нормальную работу камер в условиях больших нагрузок. Предложенный метод не приводит к увеличению шумов на проволоке и обеспечивает резкость границ области подавления.

В четвертой главе описываются процедуры калибровки дрейфовых камер установки и всей трековой системы как целого, приводятся точностные характеристики дрейфовых камер.

На первом этапе калибровка дрейфовых камер осуществлялась в эксперименте на мюонном пучке. Пучок содержал прямые одиночные треки с малым угловым разбросом (≈ 8 мрад, FWHM) и проходил через все трековые детекторы установки. Пучковые камеры использовались в качестве внешнего реперного координатного детектора для задания общей системы координат, привязки детекторов друг к другу и восстановления передаточной функции дрейфовых камер. Анализ временных спектров и восстановленных таким методом передаточных функций показал наличие систематических ошибок в этих процедурах, которые приводили к искажениям динамического диапазона временных распределений. В процессе изучения распределений сумм временных кодов в смещенных парах дрейфовых камер было обнаружено расщепление на два пика, которое в случае дрейфовых камер с распределенным потенциалом не было постоянным для дуплета. Этот разброс был интерпретирован как технологические ошибки в положении проволок при их намотке. Полученные данным методом калибровочные константы использовались как начальное приближение для последующей итерационной процедуры извлечения дрейфовых функций, в процессе которой в фит были заложены в качестве искомым параметров индивидуальные положения каждой проволоки.

Итерационная процедура калибровки состоит из следующих шагов:

1. На первом шаге задается начальное приближение для калибровочных констант.
2. Отбираются события с одиночными срабатываниями на каждой плоскости камеры и в каждой паре смещенных партнеров решается лево-правая неоднозначность.
3. Методом наименьших квадратов проводятся треки по всем исследуемым камерам для X и Y проекций независимо.
4. Для каждого события строятся отклонения "предсказанных" по треку координат (точки пересечения трека с плоскостью камеры) и измеренных координат с начальным приближением дрейфовой функции. Для каждой проволоки дрейфовой камеры в результате первой процедуры обработки всей статистики с нулевым приближением дрейфовой функции строится свой функционал, имеющий следующий вид:

$$F_x^i = \sum_{k=1}^{ntr} \{a_k^x z_i + b_k^x - [s_k(v^i t_k^i - t_0^i) + x_0^i]\}^2 \quad (0.1)$$

Здесь индекс i -соответствует номеру проволоки, k -номер трека, ntx -полное число треков, a_k^x и b_k^x - параметры трека (в данном случае по x -проекции) $x = s_k(v^i t_k - b_0^i) + x_0^i$ - линейное представление дрейфовой функции по x -проекции, где $s_k = \pm 1$ - параметр лево-правой неоднозначности, x_0^i - координата проволоки с номером i , z_i - Z -координата плоскости дрейфовой камеры, содержащей проволоку с номером i . Процедура минимизации сводится к решению системы линейных уравнений для каждого функционала. Параметры, полученные в процессе решения этих систем уравнений после первой итерации, закладываются в дрейфовую функцию, после чего процедура повторяется. Рассмотренный итерационный процесс сходится через 4-5 итераций, что легко контролируется как по значениям калибровочных констант так и по параметрам минимизируемой величины отклонения, которая описывается распределением Гаусса. Координатная точность дрейфовых камер, полученная в процессе итерационной калибровки составила ≈ 200 микрон. В процессе калибровок было получено косвенное подтверждение высокой точности установки проволочных электродов для дрейфовых камер, изготовленных по новой технологии.

В пятой главе приводится описание процедуры восстановления распадов K^- -мезонов на установке, в процессе которого иллюстрируются функции как трековой системы так и других ее детекторов. Приводятся точностные характеристики установки, результаты восстановления распада $K_{\pi 2}$ и измерения параметров формфакторов λ_+ и λ_0 в распаде $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$.

Выделение событий распадов K -мезонов осуществляется в следующей последовательности. По пропорциональным камерам PC3-PC5 проводится прямой трек пучкового K -мезона. Информация с Y -камер PC1-PC2, стоящих перед пучковым магнитом СП-56 в совокупности с данными PC3-PC5 задает углы входа и выхода трека из пучкового магнита по проекции, соответствующей отклонению по главной компоненте поля и определяет импульс K -мезона. Реконструкция вторичных треков в дрейфовых камерах DC1-DC16, стоящих между распадным объемом и спектрометрическим магнитом осуществляется программой FISTRA, позволяющей выделить до 6 заряженных треков по каждой проекции.

Процедура восстановления координат вершины распада x_v, y_v, z_v , реализуемая в программе FIDVER, сводится к минимизации следующего функционала.

$$\chi^2 = \sum_i \frac{[x_v + b_x^{pc}(z_i^{pc} - z_v) - x_i^{pc}]^2}{\sigma_i^2} + \sum_j \frac{[y_v + b_y^{pc}(z_j^{pc} - z_v) - y_j^{pc}]^2}{\sigma_j^2} + \quad (0.2)$$

$$\sum_k \frac{[x_v + b_x^{dc}(z_k^{dc} - z_v) - x_k^{dc}]^2}{\sigma_k^2} + \sum_l \frac{[y_v + b_y^{dc}(z_l^{dc} - z_v) - y_l^{dc}]^2}{\sigma_l^2} + \quad (0.3)$$

Здесь прямые треки представляются в виде $x = a_x + b_x z, y = a_y + b_y z$. Параметры треков b_x^{pc}, b_y^{pc} , найденные по пучковым камерам и b_x^{dc}, b_y^{dc} , найденные по дрейфовым камерам, служат начальными значениями при минимизации.

$x_i^{pc}, y_i^{pc}, x_i^{dc}, y_i^{dc}$ - координаты, зарегистрированные пучковыми и дрейфовыми камерами соответственно по X и по Y проекциям. z_i^{pc}, z_i^{dc} - соответствующие Z -координаты камер. Суммирование в функционале производится по i - для PC-камер X -проекции, по j - для PC-камер Y -проекции, по k - для DC-камер X -проекции, по l - для DC-камер Y -проекции. Фитируемыми параметрами являются координаты вершины x_v, y_v, z_v , а также параметры треков $b_x^{pc}, b_y^{pc}, b_x^{dc}, b_y^{dc}$. Начальное значение вершины при минимизации функционала берется в середине распадной трубы. Параметры треков $a_x^{pc}, a_y^{pc}, a_x^{dc}, a_y^{dc}$ вычисляются с помощью найденных в процессе фита координат вершины x_v, y_v, z_v и параметров $b_x^{pc}, b_y^{pc}, b_x^{dc}, b_y^{dc}$.

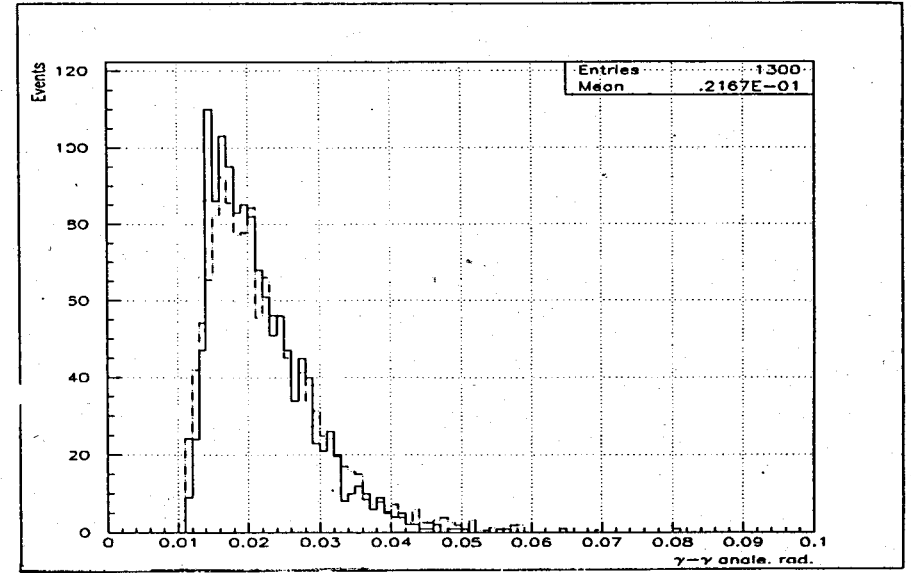


Рис. 0.8: Распределение по углу разлета γ -квантов от распада π^0 -мезона в $K_{\pi 2}$ распаде.

Распределение по углу разлета γ -квантов в $K_{\pi 2}$ -распаде, с характерным для последующего распада массивной частицы (π^0) на две безмассовых (γ), значением минимального угла разлета в лабораторной системе представлено на рисунке 8. Наблюдается хорошее согласие экспериментального распределения с результатом моделирования. Теоретическое значение минимального угла разлета для импульса K -мезона $27 \text{ ГэВ}/c$ составляет $\approx 12 \text{ мрад.}$ Найденные параметры треков и координаты вершины, а также энергии и координаты γ -квантов, определенные спектрометрами SP1 и SP2, используются в процедуре кинематического фита для идентификации конкретных мод распада.

Для оценки импульса используется соотношение [4]

$$\theta_{yz} = \lambda f(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \lambda), \quad (0.4)$$

где θ_{yz} - угол отклонения частицы в направлении, соответствующем "главной" компоненте магнитного поля, $\lambda = (P)^{-1}$, P - импульс частицы, x_0, y_0, x'_0, y'_0 - координаты трека частицы в некоторой точке z_0 и их производные по z в этой точке, f - непрерывная дифференцируемая функция. Передаточная функция спектрометрического магнита представлялась в следующем виде:

$$Y_{отка} = Y_n - Y_n = \lambda f(x_0, y_0, x'_0, y'_0, \lambda), \quad (0.5)$$

где Y_n - координата частицы, измеренная некоторой дрейфовой трубкой ДТ после магнита, Y_n - координата точки пересечения трека, восстановленного дрейфовыми камерами до магнита с плоскостью этой же ДТ.

Для нахождения передаточной функции магнита использовался простейший распад $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$ ($K_{\pi 2}$) [7]. Выделялись события с восстановленной вершиной

распада и двумя ливнями в спектрометре SP-1. Для подавления фона отбирались события с эффективной массой двух регистрируемых γ -квантов в диапазоне $m_{\gamma\gamma} = (135 \pm 30) MэВ/c^2$. Вторым критерием отбора был отбор событий на компланарность, которому должен удовлетворять любой двухчастичный распад. Для этого строилось распределение величины проекции направления K^- -мезона на векторное произведение направляющих векторов π^- -мезона и π^0 -мезона и отбирались события, для которых величина проекции лежала в пределах 0.000 ± 0.010 . Затем для гипотезы $K_{\pi 2}$ проводился кинематический ЗС-фит. Фигурируемыми параметрами были модули импульсов пучкового K -мезона и распадного π^- -мезона и три кинематические переменные π^0 -мезона. Значения импульсов π^- -мезона, полученные из фита использовались для восстановления передаточной функции магнита. Коэффициенты передаточной функции фитировались программой FUMILL, при этом в качестве начальных значений x_0, y_0, x'_0, y'_0 были взяты координаты вершины распада и направление π^- -мезона, полученные после фита, $\lambda = \frac{1}{p_{\text{фит}}}$ — обратный импульс π^- -мезона после фита со знаком (знак "-" для отрицательно заряженных частиц), Y_m — координаты π^- -мезона на дрейфовых трубках ДТ после магнита.

В результате моделирования сгенерированных по фазовому объему событий $K_{\pi 2}$, были получены следующие значения ошибок в оценках импульсов π^- и K^- -мезонов $\sigma_{\pi} < \frac{\Delta p}{p} > = 0.022, \sigma_K < \frac{\Delta p}{p} > = 0.0152$, которые характеризуют точность метода восстановления передаточной функции. Полученные оценки импульса оказались состоятельными и несмещенными, что позволило использовать их для нахождения передаточной функции магнита [7].

На рис.9 приведены распределения, характеризующие точностные параметры установки ИСТРА-М. Спектр недостающей массы π^0 -мезона в $K_{\pi 2}$ распаде, восстановленный магнитным спектрометром установки, представлен на рис.9в. $M_{\text{miss}}^{\pi^0} > = 0.132 \text{ ГэВ}/c^2, \sigma(M_{\text{miss}}^{\pi^0}) = 0.015 \text{ ГэВ}/c^2$. Импульс K -мезона был получен из кинематического ЗС-фита и составил $p_K = 27.4 \text{ ГэВ}/c, \sigma(p_K) = 0.79 \text{ ГэВ}/c$ (рис.9а). Распределение по эффективной массе K -мезона без учета информации о его импульсе с использованием данных γ -спектрометра Sp-1 и магнитного спектрометра установки, показано на рис.9б, $\langle M_K \rangle = 0.495 \text{ ГэВ}/c^2, \sigma(M_K) = 0.025 \text{ ГэВ}/c^2$. Распределение по эффективной массе π^0 -мезона представлено на рис.9г.

$\langle M_{\gamma\gamma} \rangle = 0.136 \text{ ГэВ}/c^2, \sigma(M_{\gamma\gamma}) = 0.035 \text{ ГэВ}/c^2$. Точность восстановления импульса для событий с двумя и более срабатываниями в плоскостях дрейфовых трубок по Y -проекции $\sigma(\frac{\Delta p}{p}) = 0.023$.

Средние значения эффективных масс K^- и π^0 -мезонов, а также недостающей массы π^0 -мезона в $K_{\pi 2}$ распаде соответствуют табличным значениям, что подтверждает работоспособность созданной трековой системы и спектрометров установки и правильность проведенных калибровочных процедур для ее детекторов.

В апреле 1992 года на установке был проведен сеанс, на котором было записано более 200 магнитных лент информации в режиме "мягкого триггера" - по крайней мере один электромагнитный ливень в Sp-1 при выделении K -мезона в триггерной системе. При обработке этого материала был выделен распад $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$ и проведено измерение формфакторов этого распада [8].

Отбор событий осуществлялся в следующей последовательности:

1. Отбирались события с двумя электромагнитными ливнями в Sp-1 и одной заряженной частицей, идентифицируемой как мюон [8,9]. В адронном калориметре мюон хорошо выделяется по чисто геометрическим критериям. В отличие от адрона, который дает широкий ливень, мюон приводит к срабатываниям только тех чячек НС, через которые проходит трек заряженной частицы. Требовалось

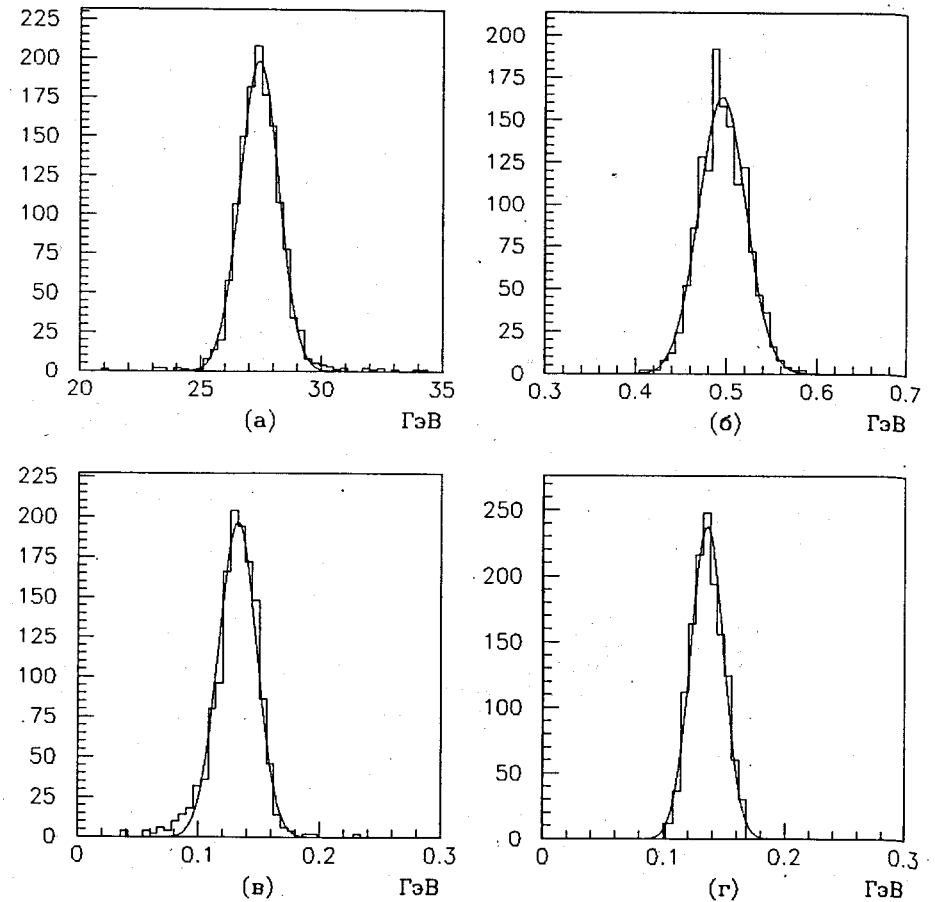


Рис.9 Распределения (для распада $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$):
 (а) — по импульсу K^- -мезона, (б) — по массе K^- -мезона,
 (в) — по недостающей массе π^0 -мезона, (г) — по эффективной массе 2γ -квантов.

срабатывание по крайней мере в пяти секциях НС по каждой проекции X и Y и их соответствие пространственному треку частицы. В Sp-1 мюон дает малое энерговыделение (< 0.7 ГэВ) в одном или двух стеклах электромагнитного калориметра [9].

2. Проводился фит вершины и оценивался импульс мюона в лабораторной системе. На рис.10 приведен scatter-plot событий с $\chi^2/ndf < 5$. Наблюдается континуум в области $M_{\gamma\gamma} \approx m_{\pi_0}$ и $M_{miss}^2 \approx 0$.

3. Проводился кинематический 2с-фит на гипотезу $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$ распада со следующими ограничениями: $M_{\gamma\gamma} = m_{\pi_0} \pm 40 MэВ$ и $M_{miss}^2 \approx 0 \pm 0.06 ГэВ^2$.

На распределении событий, прошедших фит на $K_{\mu 3}$ -гипотезу ($P(\chi^2) \geq 1\%$), на Далици-плоскости, показанном на рис.11а наблюдается пик в области максимальных значений кинетических энергий мюона и π^0 -мезона $T_{\mu}^*, T_{\pi^0}^*$. Эти события интерпретируются как фоновые от $K_{\pi 2}$ -распада с последующим распадом пиона по каналу $\pi \rightarrow \mu^- \nu$.

4. Для подавления этого фона проводился кинематический 4с-фит на $K_{\pi 2}$ гипотезу. На рис.11 б показано распределение на Далици-плоскости после отбрасывания событий, прошедших этот фит с $P(\chi^2) \geq 1\%$.

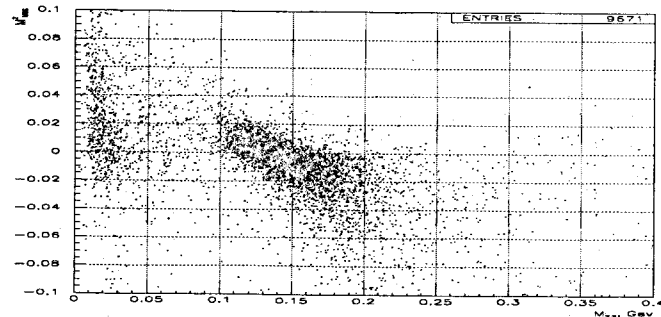


Рисунок 10. Распределение событий-кандидатов на плоскости $T_{\mu}^*, T_{\pi^0}^*$.

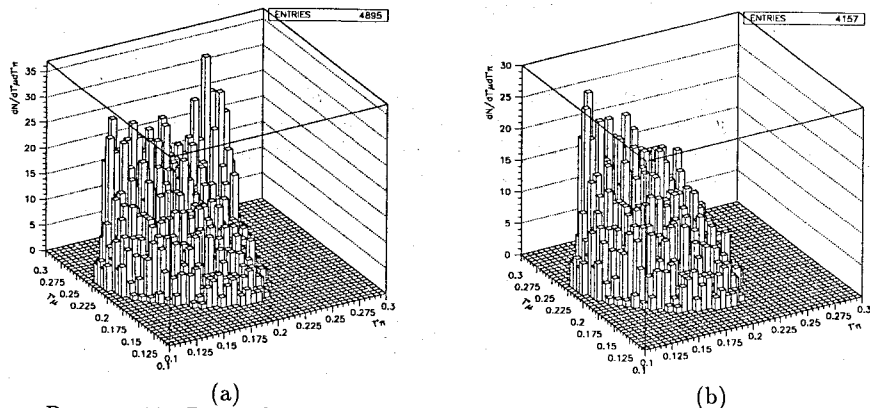


Рисунок 11. Распределение событий на Далици-плоскости до (а) и после (б) вычитания фона от $K_{\pi 2}$ распада.

На рис.12 представлен Далици-плот для отобранных с учетом акцептанса установок событий $K_{\mu 3}$ -распада. Хорошая статистическая обеспеченность плота свидетельствует о высокой эффективности регистрации распадов, что в свою очередь является следствием высокой энергии К-мезонов, при которой продукты распада летят под малыми (≤ 60 мрад) в лабораторной системе углами. Плотность распределения событий на Далици-плоскости представляется в следующем виде.

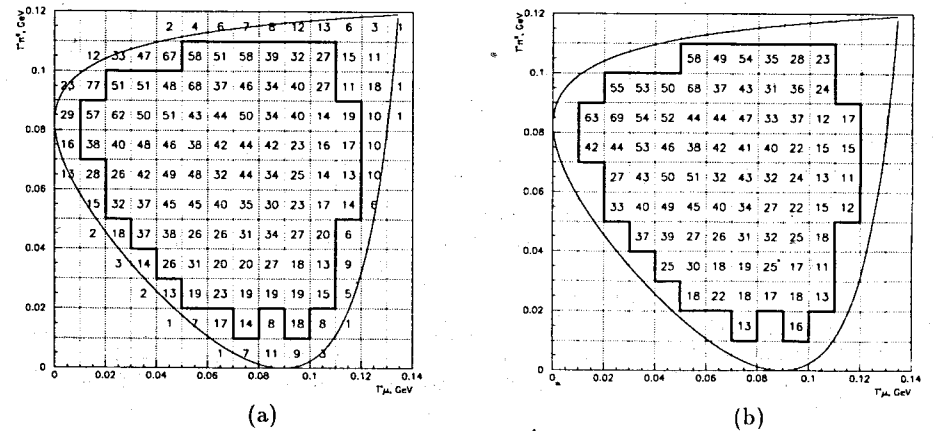


Рисунок 12. Окончательный вид Далици-плота в разбиении использованном при анализе. (а) – до поправки на эффективность установки, (б) – после поправки. При фите учитывалась только область выделенная контуром.

$$\rho(E_{\pi}, E_{\mu}) \sim Af_+^2(t) + Bf_-(t)f_+(t) + Cf_-^2(t) \quad (0.6)$$

где k и q 4-импульсы К и π -мезонов А,В,С - известные функции их энергий E_K, E_{π} , а $t = (k - q)^2$ - квадрат переданного лептонной паре 4-импульса. Одна из возможных общепринятых параметризаций формфакторов $f_+(t)$ и $f_-(t)$ в линейном приближении следующая:

$$f_+(t) = f_+(0) \left[1 + \lambda_+ \left(\frac{t}{m_{\pi}^2} \right) \right] \quad (0.7)$$

$$f_-(t) = f_-(0) + \frac{t}{M_K^2 - m_{\pi}^2} f_-(0) = f_-(0) \left[1 + \lambda_0 \left(\frac{t}{m_{\pi}^2} \right) \right] \quad (0.8)$$

Из экспериментальных данных извлекается информация о коэффициентах λ_+, λ_0 . Анализ ~ 3000 событий распада $K_{\mu 3}^-$ распада, привел к следующим значениям этих коэффициентов:

$$\lambda_+ = 0.029 \pm 0.024, \quad (0.9)$$

$$\lambda_0 = 0.062 \pm 0.024 \quad (0.10)$$

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Для эксперимента по изучению редких распадов К-мезонов на установке ИСТРА-М изготовлено по новой технологии 4 дуплета дрейфовых камер и 6 узкоазорных пропорциональных камер, а также 8 дрейфовых камер с линейно распределенным потенциалом.
2. На базе изготовленных проволочных детекторов создана трековая система, предназначенная для регистрации вторичных частиц, восстановления вершины распадов, организации триггера и измерения импульса заряженных частиц.
3. Методом "теней" с помощью β -источника ^{90}Sr измерены в лабораторных условиях характеристики созданных дрейфовых камер. Получена координатная точность камер $\approx 120 - 150$ мкм. Исследованы характеристики созданных трековых детекторов в условиях эксперимента.
4. Впервые предложена и внедрена в эксперимент новая - безрамочная технология изготовления проволочных камер, обеспечивающая высокую (≈ 5 мкм) точность установки проволочных электродов.
5. В "off-line" анализе на основе реальных данных получено подтверждение высокой точности расположения проволок в дрейфовых камерах, изготовленных по новой технологии.
6. Исследованы характеристики узкоазорных пропорциональных камер нового поколения, обладающих высоким (≈ 5 нс) временным разрешением и предназначенных для регистрации и измерения импульса частиц в пучке высокой интенсивности.
7. Впервые предложен и разработан метод создания локальной зоны нечувствительности в проволочных камерах, путем увеличения диаметра участка анодной проволоки тонким покрытием никелем. Метод внедрен на всех дрейфовых камерах установки и обеспечивает возможность регистрации вторичных частиц, вылетающих под малыми углами к оси пучка. При уровне подавления эффективности регистрации частиц пучка $\approx 10^{-4}$ метод обладает резкими границами области нечувствительности и не приводит к росту шумов на проволоке.
8. Показана работоспособность вершинного детектора, созданного на базе разработанной трековой системы из узкоазорных пропорциональных и дрейфовых камер, при максимальной интенсивности адронного пучка $2 \times 10^7 \text{ сек}^{-1}$.
9. Измерены параметры λ_+ , λ_0 в разложении векторных формфакторов в распаде $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$. Определенные значения этих параметров $\lambda_+ = 0.029 \pm 0.024$, $\lambda_0 = 0.062 \pm 0.024$ не противоречат существующим экспериментальным данным.

Диссертация написана на основе следующих опубликованных работ:

1. А.Д.Волков, Б.Ж.Залиханов, Г.Калмар, Е.В.Комиссаров, А.В.Козырев, В.З.Сердюк, В.В.Сидоркин, *Дрейфовые камеры вершинного детектора*, Материалы 8-го Рабочего Совещания по Нейтринному Детектору ИФВЭ-ОИЯИ, Д1,2,13-88-90, Дубна, стр.101.
2. H.Kalmar, A.G.Ketikjan, E.V. Komissarov, V.S.Kurbatov, V.Z.Serdyuk, V.V.Sidorkin, A.V.Voskanian and B.G.Zalikhhanov, *New methods for constructing multiwire chambers*, Nucl.Instrum.Meth. vol.A307,1991, p.279.
3. H.Kalmar, A.G.Ketikjan, E.V.Komissarov, V.S.Kurbatov, V.Z.Serdyuk, V.V.Sidorkin, A.D.Volkov, A.V.Voskanian, O.H.Voskerchjan, B.G.Zalikhhanov, *Development of the Method of Multiwire Detectors Working in High Rate Environment*, Proc. of the Third Workshop "Physics at UNK", p.31, Protvino, September,1990.
4. A.D.Volkov, A.V.Voskanian, O.G.Voskerchian, B.J.Zalikhhanov, G.Kalmar, A.J.Ketikian, E.V. Komissarov, V.S.Kurbatov, V.Z.Serdyuk, V.V.Sidorkin, *Method for the calculation of charged particle momentum in magnetic spectrometers*, Nucl.Instrum.Meth. vol.A306,1991, p.278.
5. А.Д.Волков, А.В.Восканян, Б.Ж.Залиханов, А.И.Иваненко, А.Ж.Кетикян, Е.В.Комиссаров, В.С.Курбатов, С.И.Мисютин, В.З.Сердюк, В.В.Сидоркин, В.И.Снятков, Ю.Р.Тер-Акопов, *Измерение магнитного поля спектрометрического электромагнита установки "ИСТРА-М"*, Препринт ОИЯИ P1-94-180, Дубна,1994.
6. Е.М.Gushchin, E.V.Komissarov, Yu.V.Musienko, A.A.Poblaguev, V.Z.Serdyuk and B.Zh.Zalikhhanov, *Fast Beam Chambers of the Set-up "ISTRA-M"*, Nucl.Instrum.Meth. vol.A351,1994, p.345.
7. В.М.Артемюв, В.Н.Болотов, А.Д.Волков, Е.Н.Гушин, Г.А.Емельяненко, Б.Ж.Залиханов, А.Ж.Кетикян, Е.В.Комиссаров, В.С.Курбатов, И.Н.Семенюк, В.З.Сердюк, В.В.Сидоркин, И.Н.Силин, С.В.Ященко, *Калибровка спектрометрического магнита установки ИСТРА-М на физическом процессе*, Препринт ОИЯИ P10-94-521, Дубна,1994.
8. В.М.Артемюв, А.Д.Волков, Г.А.Емельяненко, Б.Ж.Залиханов, Е.В.Комиссаров, В.С.Курбатов, В.З.Сердюк, В.В.Сидоркин, И.Н.Силин, С.В.Ященко, В.Н.Болотов, А.В.Веселовский, С.А.Волков, Е.Н.Гушин, В.С.Клименко, С.В.Лаптев, В.Н.Марин, И.Н.Семенюк, В.Л.Шматков, А.В.Восканян, А.Ж.Кетикян, В.Ф.Константинов, *Определение параметров формфакторов λ_+ , λ_0 в распаде $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$* , Препринт ОИЯИ P1-95-330, Дубна,1995.
9. В.М.Артемюв, В.Н.Болотов, С.А.Волков, А.В.Восканян, Г.А.Емельяненко, Б.Ж.Залиханов, А.Ж.Кетикян, Е.В.Комиссаров, В.С.Курбатов, С.В.Лаптев, И.Н.Семенюк, В.З.Сердюк, В.В.Сидоркин, И.Н.Силин, С.В.Ященко, π , e , μ -идентификация частиц на установке "ИСТРА-М", Препринт ОИЯИ P1-95-346, Дубна,1995.
10. В.Н.Болотов, А.В.Веселовский, С.А.Волков, С.Н.Гниненко, Е.Н.Гушин, В.В.Исаков, О.В.Каравичев, В.С.Клименко, В.А.Лебедев, В.Н.Марин, Ю.В.Мусиенко, А.А.Поблагуев, В.В.Постоев, И.Н.Семенюк, А.Д.Волков, Б.Ж.Залиханов, Е.В.Комиссаров, В.С.Курбатов, В.З.Сердюк, В.В.Сидоркин, В.Ф.Константинов, А.В.Восканян, А.Ж.Кетикян, *Установка ИСТРА-М для исследования редких распадов заряженных легких мезонов*, Препринт ИФВЭ 95-111, ОЭИУНК, Протвино,1995.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 января 1996 года.