

К-471
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-95-432

На правах рукописи
УДК 539.1.074 + 539.126.13

КЛАДИВА
Эдуард

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ГАЗОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ K_{31} -РАСПАДОВ,
ПОИСКА БЕЗНЕЙТРИННОГО 2β -РАСПАДА
И ИССЛЕДОВАНИЯ
СИЛЬНО НЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫХ ЯДЕР

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1995

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук БУДАГОВ Юлиан
профессор Арамович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Акимов Юрий
профессор Константинович

кандидат физико-математических наук, Вовенко Анатолий
Серафимович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Физический Институт им. П.Н.Лебедева РАН, г.Москва

Защита диссертации состоится "___" _____ " 1995г.
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 "1" ^{XI} _____ 1995 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук Ю.А.Багусов

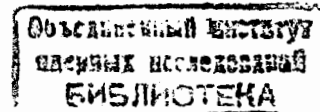
Актуальность работы. Одной из составных частей современных экспериментальных установок в физике атомного ядра и элементарных частиц являются газовые координатные детекторы, которые применяются не только в качестве трековых детекторов, но и как составная часть калориметров. Сложность и значительный объем измерительной аппаратуры в современных экспериментах приводит к тому, что стоимость оборудования становится одним из важных ограничений на реализацию идей экспериментаторов и ее снижение является важной задачей в развитии детекторной техники. Перспективными в этом направлении являются детекторы, которые могут одновременно измерять несколько характеристик регистрируемой частицы, как напр. траекторию частицы и ее позиционную способность вдоль траектории во время-проекционной камере или энергию и координату в позиционно-чувствительном калориметре.

Целесообразно снижение числа каналов дорогостоящей электроники. Актуальность данной работы заключается в разработке, создании и применении в физическом эксперименте газовых координатных детекторов с улучшенными параметрами и низкой стоимостью единицы чувствительной площади детектора. Развитие методики, связанной с этими детекторами, делает возможной постановку более точных экспериментов, измерение ранее известных параметров реакций с более высокой точностью, изучение тонких эффектов, ранее недоступных для экспериментальных исследований.

Цель работы:

Основной целью является развитие методики газовых детекторов с одновременным измерением нескольких характеристик регистрируемой частицы и разработка методов снижения стоимости таких детекторов:

1. Разработка и создание прототипа и исследование характеристик время-проекционной камеры для полной 3-мерной реконструкции треков в многочастичных процессах, в частности в эксперименте по поиску безнейтринного двойного β -распада.
2. Разработка и исследование безэлектродных дрейфовых камер в экспериментах на ускорителе, в частности, в качестве трекового детектора для эксперимента по оценке вклада скалярного и тензорного формфактора в матричный элемент распада $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$.



3. Разработка радиационно стойкого и быстродействующего электромагнитного калориметра с определением координат оси электромагнитного ливня для центральной области калориметра Многочастичного Спектрометра и изучение его свойств.

Научная новизна:

Создана время-проекционная камера, в которой для определения второй координаты применен метод линий задержки и реализован метод отбора сигналов от камеры для однозначного определения координаты трека, позволяющий существенно сократить время обработки информации и снизить количество ложных треков.

Предложена установка для эксперимента по прямому изучению двойного β -распада на основе время-проекционной камеры, которая позволяет существенно понизить уровень фоновых процессов в поисках безнейтринного 2β -распада.

Изучено влияние параметров диэлектрика на свойства безэлектродных дрейфовых камер и предложены методы, обеспечивающие высокую и стабильную эффективность регистрации частиц в потоках частиц высокой интенсивности.

Предложен и на модели изучен новый тип позиционно-чувствительного калориметра на основе измерения ионизации в сжатом газе. Газовый ионизационный слоистый калориметр отличается быстродействием и высокой радиационной нагрузкой, хорошим энергетическим и высоким координатным разрешением.

Практическая ценность заключается в применении разработанных детекторов в экспериментах по физике ядра и элементарных частиц, в частности, использование безэлектродных дрейфовых камер в экспериментах на установке Гиперон на ускорителе У-70 (ИФВЭ Серпухов). Разработанный метод динамической стабилизации поверхностной плотности заряда в безэлектродных дрейфовых камерах позволил использовать их в составе ливневого детектора для достижения рекордной точности определения координаты оси электромагнитного ливня.

Создана время-проекционная камера для трехмерной реконструкции треков заряженных частиц в многочастичных процессах с размерами чувствительного объема $800 \times 350 \times 1600$ мм³ и с общим числом каналов 240. Камера вошла в состав проекта КОМБАС, где готовится к применению в качестве финального детектора в эксперимен-

тах по изучению характеристик сильно нейтроноизбыточных ядер. На основе изучения свойств время-проекционной камеры предложена установка для эксперимента по изучению 2β -распада, который реализуется в рамках широкой коллаборации (включая ОИЯИ) в Словакии.

Предложенный и экспериментально проверенный газовый ионизационный слоистый калориметр с измерением координаты ливня стал основой многочисленных разработок адронных и электромагнитных калориметров для области очень высоких скоростей в новых детекторных установках на ускорителях SSC и LHC.

Автор защищает:

1. конструкцию и результаты изучения характеристик время-проекционной камеры, позволяющей проводить трехмерную реконструкцию треков в многочастичных процессах
2. применение метода отбора сигналов от время-проекционной камеры для определения координат трека, позволяющего существенно снизить число комбинаций сигналов в процессе восстановления трековой картины
3. предложение установки для эксперимента по прямому изучению двойного β -распада на основе время-проекционной камеры, помещенной в магнитном поле с твердотельным источником 2β -распада в чувствительном объеме камеры
4. метод динамической стабилизации поверхностной плотности заряда в безэлектродных дрейфовых камерах в интенсивных и резко меняющихся потоках частиц
5. применение безэлектродных дрейфовых камер в измерении значений отношения скалярного и тензорного формфакторов к векторному формфактору в процессе $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ при энергии K^+ -мезона 10.7 ГэВ/с²
6. новый вид позиционно-чувствительного ионизационного слоистого калориметра на основе сжатого газа.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-методических семинарах ЛЯП и ЛВЭ ОИЯИ, ИЭФ Кошице, Международных научных конференциях по физике высоких энергий в Беркли (1986 г.) и Мюнхене (1988 г.), Международной конференции по координатным детекторам в Дубне (1987 г.), Рабочем совещании "Физика на УНК" в Серпухове (1990 г.), опубликованы

в виде отечественных и зарубежных журнальных статей и изданий ОИЯИ.

Публикации. В диссертации обобщены результаты работ, выполненных автором в 1984 - 1990 гг. во время пребывания в ЛЯП ОИЯИ. Основные результаты работы изложены в 14 публикациях. **Структура публикации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, в котором приводятся основные выводы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, сформулированы цели работы, отмечена ее новизна и практическая ценность, определены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации содержит описание конструкции прототипа время-проекционной камеры и результаты изучения ее характеристик на модели.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ разработан проект Большой Адронный Спектрометр (БАС). Долгосрочная физическая программа для БАС включала систематическое изучение локальной структуры адронов в бинарных и инклюзивных процессах с высокой множественностью обычных и странных частиц. В качестве трекового детектора БАС с чувствительным объемом $5 \times 4 \times 2 \text{ м}^2$ для 3-мерной реконструкции траекторий частиц в процессах с высокой множественностью выбрана время-проекционная камера. Для освоения методики и изучения свойств детектора нами создана модель время-проекционной камеры с размерами чувствительного объема $800 \times 350 \times 60 \text{ мм}^3$ и прототип камеры с размерами $800 \times 350 \times 1600 \text{ мм}^3$.

Гомогенное электрическое поле в чувствительном объеме камеры (рис. 1) формируется с помощью высоковольтного катода (КП) и системы полеформирующих электродов (ПЭ) в виде трубок с толщиной стенки 0.2 мм. Линейно падающий потенциал для трубок задается с точностью $\leq 1\%$ резистивным делителем (РД). Область газового усиления формируется сеткой из чередующихся сигнальных (СП) и полеформирующих (ПП) проволочек, натянутых с шагом 5 мм, и отделяющей сеткой (ЗС). Замыкает область газового усиления линия задержки (ЛЗ) для определения второй координаты. Две соседних анодных проволочки над линией задержки объединены на один вход предусилителя и таким образом формируются слои толщиной 2 см. В прототипе камеры создано 80 слоев, в модели 3 слоя. Для управления процессом

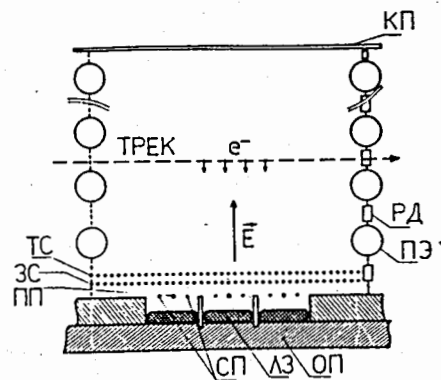


Figure 1: Поперечный разрез время-проекционной камерой.

сбора электронов в камере на высоте 3 мм над отделяющей сеткой натянута (параллельно направлению пучка) триггерная сетка (ЕС). Отдельные проволочки сетки объединены в полоски шириной 2 см, которыми можно управлять самостоятельно [6].

Для регистрации частиц в процессах с высокой множественностью создана специальная электронная аппаратура (рис. 2), которая обладает следующими свойствами:

- с высокой точностью (1 нс) измеряет время прихода сигнала
- регистрирует большое количество сигналов в течение длительного интервала времени (16 мкс)
- обладает малым мертвым временем (64 нс)
- с высокой частотой (64 нс) измеряет амплитуду отдельных сигналов.

Ее принцип состоит в стробировании входного состояния с высокой частотой, одновременном быстром запоминании информации в круговой памяти и в считывании и последующей обработке "обратно по времени" после прихода триггерного сигнала.

Нами детально исследованы характеристики время-проекционной камеры в пучке минимально ионизирующих частиц. Камера работает с эффективностью регистрации частиц близкой к 100%. Она обладает хорошей линейностью зависимости времени прихода сигнала от координаты траектории первичной частицы. Показано, что на точность определения координаты траектории частицы существенное влияние оказывает диффузия. Зависимость пространственного разреше-

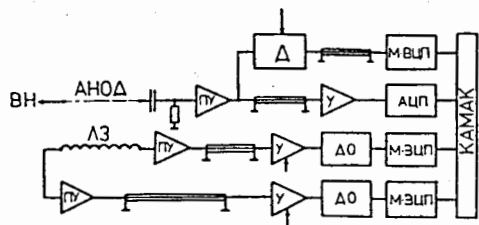


Figure 2: Блок- схема канала электроники. ЛЗ - линия задержки; ПУ - предусилитель; Д - дискриминатор; У - регулируемый усилитель; Д0 - детектор нулевого уровня; М-ВЦП - многостоповый ВЦП; АЦП - быстродействующий параллельный АЦП; ВН - высокое напряжение.

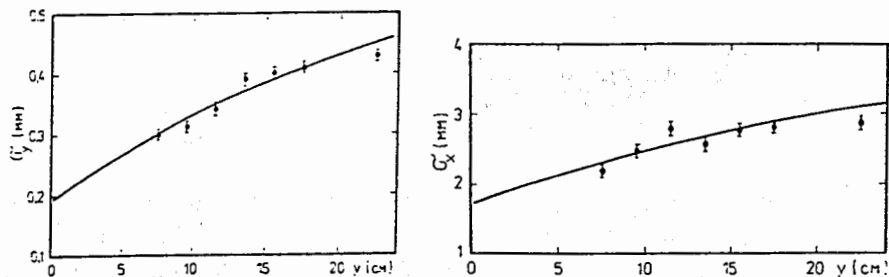


Figure 3: Пространственное разрешение по направлению дрейфа (налево) и вдоль сигнальных проволочек (направо) в зависимости от длины дрейфа.

ния в вертикальном направлении от длины дрейфа (рис. 3) описывалась функцией $\sigma_y(y) = \sqrt{a_y^2 \cdot y + b_y^2}$, в которой диффузионный член $a_y = 0.086 \pm 0.003 \text{ мм}/\sqrt{\text{см}}$, а член, объединяющий разброс кластеров и вклад аппаратуры, $b_y = 0.189 \pm 0.021 \text{ мм}$.

Показаны преимущества определения второй координаты с помощью линии задержки. Линия задержки плотно намотана на корпусе сложной формы с вклеенными компенсирующими печатными платами. Ее длина - 850 мм и поперечные размеры - $18 \times 5 \text{ мм}^2$. Разработке линии задержки посвящена серьезная часть методических исследований и достигнуты параметры на уровне лучших мировых разработок (таблица 1.).

Влияние диффузии дрейфующего облака электронов на пространственное разрешение вдоль сигнальных проволочек показано на рис. 3. Здесь диффузионный член имеет значение $a_x = 0.548 \pm 0.022 \text{ мм}/\sqrt{\text{см}}$ (он связан с коэффициентом поперечной диффузии, а для анодного сигнала с коэффициентом продольной диффузии электронов) и вклад аппаратуры составляет $b_x = 1.74 \pm 0.074 \text{ мм}$.

Для эффективной реконструкции трековой картины в многочастичных процессах нами применен метод считывания сигнала с обоих кон-

Table 1: Параметры линии задержки

активное сопротивление	360 Ом
импеданс	1000 Ом
задержка	4.76 нс/мм
ослабление сигнала	1.2 дБ/мкс
фронт сигнала	70нс

цов линии задержки. Если задаться условием $t_R + t_L - 2 \cdot t_d - t_{DL} < 150 \text{ нс}$, где t_R и t_L - времена прихода сигналов на правый и левый концы линии задержки, t_d - время дрейфа электронов, а t_{DL} - постоянная, то с высокой достоверностью на уровне $3\sigma_{DL}$ можно выделить сигналы от анода и линии задержки, соответствующие одной частице. Область, в которой нельзя данным методом разделить два трека, занимает меньше, чем 3% чувствительной площади камеры.

Вторая глава диссертации посвящена использованию время-проекционной камеры в физическом эксперименте. Созданный прототип ВПК нами предложено применить для исследования ядер с большим избытком нейтронов, что является актуальной задачей с точки зрения выбора правильной теории, описывающей свойства экзотических ядер, а также для экспериментального определения границы ядерной стабильности. Эффекты статической деформации ядер, когда изотопы, нестабильные в сферическом ядерном потенциале, могут стать стабильными в деформированном состоянии, планируется изучать в рамках международного проекта КОМБАС [14].

В Лаборатории ядерных реакций (ОИЯИ Дубна) на базе циклотронов У-400 и У-400М создан ускорительный комплекс, который способен давать пучки тяжелых ионов до энергии 100 - 150 МэВ/А. Для эффективного сбора ядер, образованных в ядерных реакциях на мишени, используется спектрометрический магнитный канал. В качестве финального детектора используется нами разработанный прототип время-проекционной камеры [13]. Она позволяет измерить характеристики ядер, чувствительные к форме ядра:

- полупериоды распада $\tau_{1/2}$ для β -радиоактивных ядер, когда вследствие изменения четности в деформированном ядре может стать разрешенным переход, запрещенный в нормальных условиях, и $\tau_{1/2}$ может уменьшиться вдвое

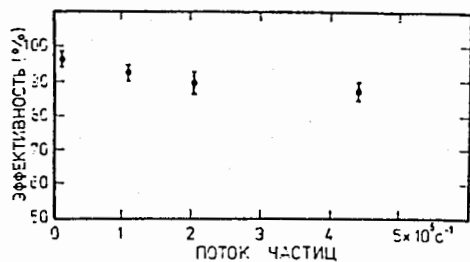


Figure 4: Зависимость эффективности регистрации частиц от интенсивности потока частиц через камеру.

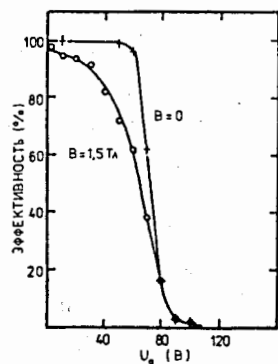


Figure 5: Управление эффективностью регистрации частиц с помощью запирающей сетки вне магнитного поля и в магнитном поле $B=1.5$ Тл, параллельном направлению дрейфа.

- вероятность эмиссии нейтронов из β -запаздывающего распада дочернего ядра резко снижается при изменении четности деформированного ядра
- среднеквадратический размер ядра, который медленно растет при удалении от области β -стабильных ядер
- сечение ядерных реакций, где в спектре импульсного распределения продуктов реакции могут наблюдаться узкие пики, соответствующие срыву двух взаимосвязанных поверхностных нейтронов.

Недостатком известных стандартных разработок ВПК является снижение эффективности регистрации частиц в пучке пиков с высокой интенсивностью. Падение трековой эффективности до 85 % в потоке частиц высокой интенсивности, показанное на рис. 4, связано с накоплением объемного заряда около анодных проволочек. Для повышения эффективности нами введена в камеру триггерная сетка, которая пропускает в область газового усиления дрейфующие электроны только от события, на которое выработан внешний триггер. Как показано на рис.5, триггерная сетка работает эффективно в магнитном поле и без него [6].

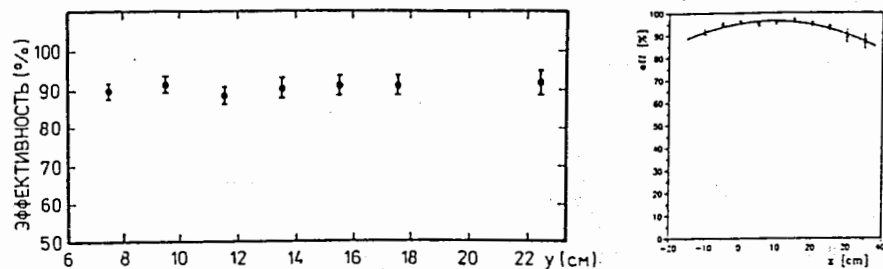


Figure 6: Зависимость трековой эффективности от длины дрейфа электронов (налево) и от координаты вдоль сигнальных проволочек (направо).

Высокая точность определения координат трека частицы в 3-мерном изображении и возможность измерения позиционных потерь вдоль ее траектории делают время-проекционную камеру привлекательной для поиска безнейтринной моды 2β -распада. Преимуществом методики прямого наблюдения 2β -распада является возможность измерения энергетического спектра распадов и, следовательно, определения типа 2β -распада. Основной трудностью этих экспериментов является определение фоновых процессов и их подавление.

Нами разработана установка для изучения $(2\beta)_{0\nu}$ -распада с помощью ВПК, помещенной в слабом магнитном поле [9], которая позволяет проводить полную 3-мерную реконструкцию треков частиц в ВПК и измерение позиционных потерь энергии частицы вдоль ее траектории. Источник 2β -распада располагается непосредственно в чувствительном объеме камеры. Рассмотрены три варианта ВПК и оптимизирована конструкция камеры для достижения низкого уровня собственной радиоактивности детектора. Активность подобранных материалов, используемых в конструкции камеры, ниже 10 мБк/кг.

Характеристики камеры изучены нами на модели камеры. Достигнутые точности определения координат трека и высокая трековая эффективность позволяет определить вершину 2β -распада с точностью 2 мм и достигнуть импульсное разрешение 10 %, что достаточно для эффективного подавления основных фоновых процессов. Показано, что камера работает с трековой эффективностью более 90 % во всем объеме камеры (рис. 6). В результате ожидаемый уровень фона в ВПК составляет 0.003 событий/кэВ в год, откуда следует нижний предел для времени полураспада безнейтринного 2β -распада

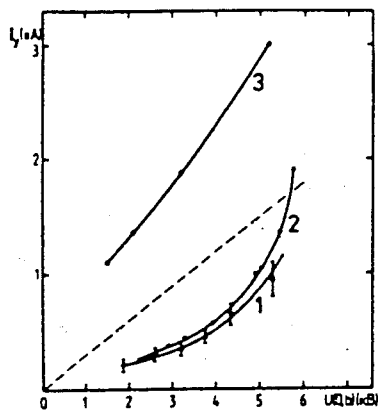


Figure 7: Зависимость объемного тока утечки от потенциала $U(0, b)$ в безэлектродной дрейфовой камере для разной интенсивности потока частиц: 1 – в фоновых условиях $\Phi = 0$; 2 – при средней интенсивности $\Phi = 10^5$ част./сброс; 3 – при высокой интенсивности $\Phi = 10^6$ част./сброс.

за один год экспозиции $12.2 \cdot 10^{23}$ лет для изотопа ^{96}Zr и $7.9 \cdot 10^{23}$ лет для ^{150}Nd [9]. Предложенная конструкция детектора и электронная аппаратура создаются в Словакии в рамках широкой международной коллаборации с участием ОИЯИ [7].

В третьей главе содержится описание разработанных нами методов преодоления падения эффективности регистрации частиц в безэлектродных дрейфовых камерах, которое наблюдалось при повышенной интенсивности потока частиц через камеру. До наших исследований камеры данного типа применялись только в потоках малых интенсивностей от радиоактивных источников.

Гомогенное дрейфовое поле в безэлектродной камере создается поверхностным слоем положительных ионов, которые образуются в процессе газового усиления и оседают на внутренние поверхности диэлектрических стенок камеры. Нами подробно изучен процесс формирования слоя ионов в зависимости от разных сортов диэлектрика, использованного для конструкции камеры [5]. Установлено, что в камере важно соотношение тока диффузии дрейфующих ионов и тока утечки заряда с внутренней поверхности стенок камеры. Показано, что диапазон значений интенсивности потока частиц, в котором камера работает с высокой эффективностью, зависит от объемного сопротивления диэлектрика. Найден диапазон значений удельного сопротивления диэлектрика $\rho_V = 10^{12} \div 5 \cdot 10^{14}$ для устойчивой работы камер в интенсивных потоках частиц до $5 \cdot 10^5$ част./с.

Выбор режима работы безэлектродной камеры нами предложено

проводить по соотношению потенциала на внутренней поверхности стенок камеры и тока утечки, которое показано на рис. 7. Штрифовой линией указана зависимость для идеально заряженной поверхности. Кривые 1 и 2 мало отличаются и при малых значениях анодного напряжения камера недозаряжена. Подбором анодного напряжения можно при данной интенсивности потока частиц получить гомогенное поле в дрейфовой области. В потоке частиц интенсивностью 10^6 частиц/сброс, как показывает кривая 3, оптимальный режим установить нельзя и необходимо применить диэлектрик с более низким значением удельного сопротивления.

Важным параметром безэлектродных дрейфовых камер является время рассасывания избыточного свободного заряда со стенок камеры, которое определяет скорость стабилизации режима камеры после изменения интенсивности потока частиц (рис. 8). Нам определены постоянные времени стабилизации формы потенциала в дрейфовом объеме и эффективности камеры $\tau \approx 4750$ сек. Показана связь этих величин с параметрами диэлектрика. Предложен метод стабилизации поверхностной плотности заряда, который заключается во введении вспомогательного электрода в камеру, поддержке постоянной разности потенциала между поверхностью диэлектрика и анодной проволокой и в применении усилителя с регулируемым усилением. Как показано на рис.8, метод позволил сократить время восстановления эффективности камер после резкого изменения интенсивности потока частиц через камеру до 3 минут [4].

Благодаря этому оказалось возможным применить созданные безэлектродные дрейфовые камеры общей площадью 4 m^2 в физической программе на ускорителе, направленной на изучение распадов K^+ . В рамках модернизации установки Гиперон, на которой выполняется эта программа, создан широкоапертурный электромагнитный калориметр на основе свинцового стекла. В нем применена система из активного конвертора и безэлектродных дрейфовых камер [1,3], которая улучшила координатную точность калориметра в 2 раза. На основе изучения поперечного распределения заряда в электромагнитном ливне нами обоснован метод обработки информации с безэлектродных дрейфовых камер, который улучшил точность определения оси электромагнитного ливня при использовании данных с этих камер в 1.4 раза. Двухливневое разрешение улучшено до 35 мм [8].

Созданные на основе проведенных методических исследований ши-

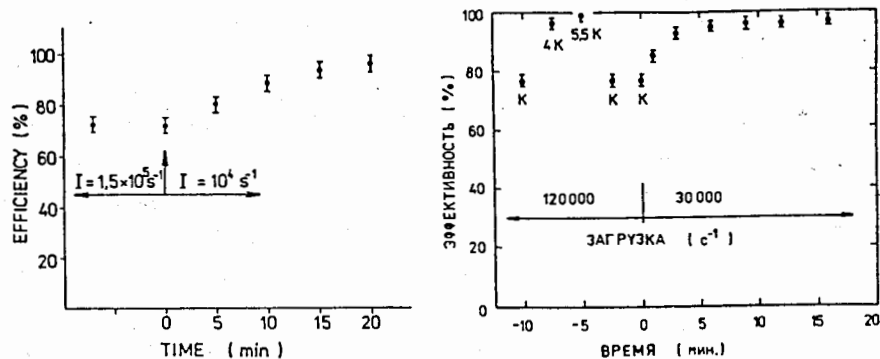


Figure 8: Восстановление эффективности регистрации частиц после снижения загрузки в безэлектродной дрейфовой камере без стабилизирующих электродов (слева) и со стабилизирующим электродом (справа).

рокоазорные безэлектродные дрейфовые камеры впервые применены в качестве трекового детектора в эксперименте по исследованию распада $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$, который поставлен на установке Гиперон в рамках программы изучения распадов K^+ . Безэлектродные дрейфовые камеры использовались для реконструкции треков от заряженных продуктов распада. Их высокое пространственное разрешение увеличило статистику восстановленных событий распадов $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ на диаграмме Далитца на 25 % и повысило точность определения соотношения тензорной и скалярной составляющей формфактора к его векторной составляющей [12]. В результате получены самые точные на данное время - значения этих отношений.

Четвертая глава содержит описание конструкции и полученные в исследовании на пучке частиц основные характеристики координатного ионизационного калориметра на сжатом газе для центральной части заднего калориметра установки Многочастичный Спектрометр (МЧС). Основной физической задачей проекта МЧС, включенного в первоочередную исследовательскую программу с фиксированной мишенью на ускорителе УНК, являлось изучение физики тяжелых кварков (b и c), особенно фундаментальных вопросов физики B -частиц. Задний электромагнитный калориметр установки МЧС предназначен для регистрации γ -квантов, электронов и позитронов с энергией до 600 ГэВ. Его центральная часть подвергается облучению интенсивным потоком частиц с широким диапазоном энергии, преимуще-

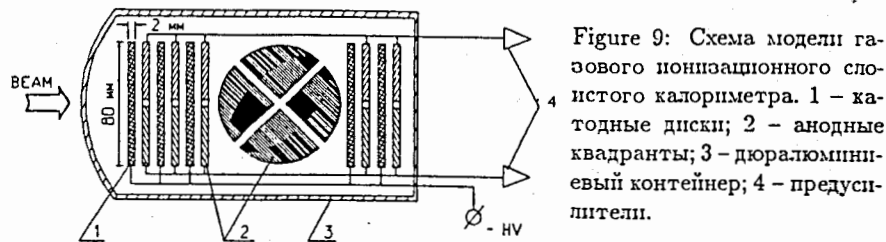


Figure 9: Схема модели газового ионизационного слоистого калориметра. 1 - катодные диски; 2 - анодные квадранты; 3 - дюралюминиевый контейнер; 4 - предпуслители.

ственно γ -квантов под малым углом разлета.

Нами разработан модульный газовый электромагнитный калориметр с детектором на основе ионизационных камер с высоким давлением рабочего газа и с организацией считывающих электродов в виде башен [10]. Ранее применялись слоистые газовые калориметры, работающие при атмосферном давлении, но достигнутое энергетическое разрешение недостаточное. Единственное методическое исследование энергетического разрешения ионизационного слоистого калориметра на сжатом газе было выполнено группой Долгошепна (*Nucl. Instr. and Meth.* 159, (1979) pp. 83-92.).

Нами создана модель калориметра, определен режим работы и исследованы характеристики калориметра. Модель состоит из 70 ионизационных камер в форме диска, собранных в цилиндр. Толщина рабочего объема каждой камеры 2 мм, диаметр чувствительной площади 80 мм. Свинцовые электроды камер толщиной 2 мм служат одновременно поглотителем. Анодные диски разделены на четыре квадранта и все квадранты расположенные друг за другом, соединены продольно в 4 башни. Каждая башня подключена к отдельному предпуслителю. Калориметр помещается в дюралюминиевый цилиндрический корпус, рассчитанный на высокое давление газа до 50 атм, который наполнялся ксеноном или аргоном с добавкой 10% CH_4 .

Показана линейная зависимость величины собранного заряда от энергии частицы и от давления рабочего газа. Получено энергетическое разрешение калориметра $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{15\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{30\%}{E}$ для давления рабочего газа 20 атм. Это разрешение для энергий регистрируемых частиц выше 100 ГэВ сравнимо с разрешением жидкоаргонных калориметров и калориметров на основе свинцового стекла [11].

Для определения координаты оси электромагнитного ливня использовалась функция $\frac{A_1}{(A_1+A_2)} = 0.5 \cdot [1 - \coth \alpha(x - \beta)]$, где A_1 - сумма амплитуд двух соседних башен, координата центра которых $x > 0$, а A_2

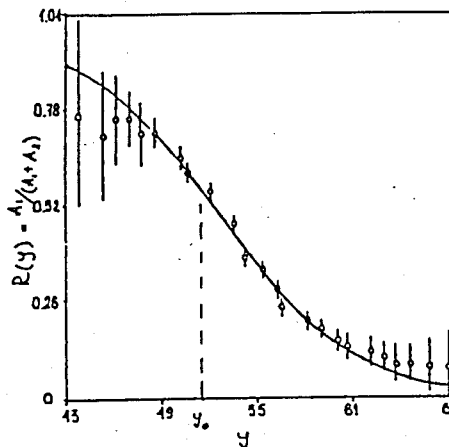


Figure 10: Зависимость отношения амплитуд $R(y) = A_1/(A_1 + A_2)$ от координаты налетающего электрона y . Сплошной линией указана зависимость $R(y) = 0.5 \cdot [1 - \coth \alpha(y - \beta)]$, где $\alpha = 0.115$ $\beta = 52.6$.

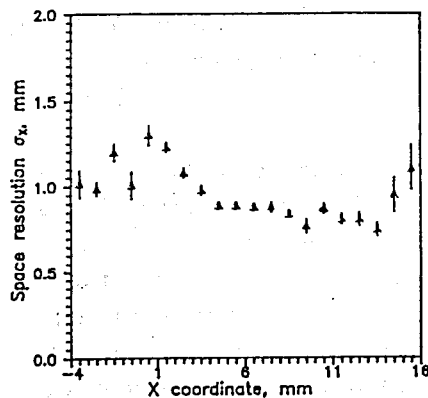


Figure 11: Пространственное разрешение газового ионизационного слоистого калориметра в зависимости от координаты попадания первичного электрона. $E_e = 26.6$ ГэВ, газ Xe + 10 % CH₄, давление 20 атм.

соответственно для $x < 0$. Величины параметров $\alpha = 0.115$ и $\beta = 53$ получены из экспериментальной зависимости, показанной на рис. 10.

Среднеквадратические отклонения распределения разности координаты оси электромагнитного ливня и координаты налетающего электрона в зависимости от координаты попадания электрона в калориметр показаны на рис. 11. Координатное разрешение калориметра после вычета вклада пропорциональных камер составило $\sigma_x = 0.8$ мм при энергии электронов 26.6 ГэВ [11].

Применение газового калориметра обеспечивает существенное снижение затрат не только на создание установки, но и во время работы установки. Впервые разработанный и экспериментально проверенный вид позиционно-чувствительного калориметра отличается высоким быстродействием, хорошим энергетическим и координатным разре-

шением и высокой радиационной стойкостью, что позволяет применять его в области высокой радиационной нагрузки в крупных установках на ускорителях ТэВ-ного диапазона энергий. Данная работа послужила стартовой для детального изучения рядом групп характеристик газовых ионизационных калориметров для их применения в качестве электромагнитного и адронного калориметров.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации:

1. Создана время-проекционная камера для трехмерной реконструкции треков заряженных частиц в многочастичных процессах. Размеры чувствительного объема камеры – 800x350x1600 мм³ и общее число каналов – 240. В камере предусмотрен режим быстрого триггирования и изменения формы чувствительного объема. Детально изучены характеристики камеры на модели и получены выражения для координатного разрешения в вертикальном (σ_y) и горизонтальном (σ_x) направлениях [6]:

$$(\sigma_y)^2 = (0.026 \pm 0.001)^2 * y[mm] + (0.189 \pm 0.021)^2 [mm]$$

$$(\sigma_x)^2 = (0.165 \pm 0.007)^2 * y[mm] + (1.740 \pm 0.074)^2 [mm].$$
2. Применен метод определения второй координаты во время-проекционной камере на основе точного измерения времени прихода сигналов к обоим концам линии задержки, благодаря чему существенно ускорен алгоритм определения координат треков отдельных частиц в событиях с высокой множественностью и снижено количество ложных треков. Двухтрековое разрешение составляло 10 мм в горизонтальном направлении и 4.5 мм в вертикальном. Трековая эффективность достигала 90 % [6].
3. Создана электронная аппаратура для съема и обработки сигнала от анодных проволочек и линий задержки время-проекционной камеры, в которую входит блок аналоговой электроники с детектированием максимума сигнала и блок оцифровки, включающий быстродействующий зарядочувствительный 6-битный АЦП, строблирующий сигнал с частотой 15.6 МГц, и многостоповый ВЦП с временным разрешением до 1 нс и мертвым временем 64 нс.
4. Предложена установка для исследования двойного β -распада в твердых веществах с помощью время-проекционной камеры,

помещенной в слабое магнитное поле. Изучены варианты размещения радиоактивных образцов и геометрии камеры. Уровень фона подавлен до 0.003 событий/кэВ в год, что позволяет достигнуть нижний предел времени полураспада для $2\beta(0\nu)$ процесса $12.2 \cdot 10^{23}$ лет. Предложенная конструкция детектора и электронная аппаратура созданы в Словакии в рамках широкой международной коллаборации с участием ОИЯИ [9].

5. Предложено применение созданной (пункты 1. - 3.) время-проекционной камеры в качестве финального детектора магнитного канала сепарации для изучения характеристик ядер изотопов легких элементов с избытком нейтронов вблизи границы стабильности. Созданная аппаратура вошла в международный проект COMBAS, который находится в стадии сборки и отладки отдельных узлов установки в ЛЯР ОИЯИ [14].
6. На основе изучения диэлектрических свойств полимерного изолятора предложен и экспериментально обоснован метод динамической стабилизации поверхностной плотности заряда, формирующего электрическое поле в дрейфовой области безэлектродных дрейфовых камер, что позволило использовать их в составе системы "Активный Конвертор - Широкоазорные Дрейфовые Камеры - Ливневой Годоскопический Детектор" и улучшить точность определения координаты оси ливня в электромагнитном калориметре установки Гиперон в 3.5 раз. Двухливневое разрешение составило 35 мм [8].
7. Безэлектродные дрейфовые камеры использованы впервые на ускорителе в эксперименте по изучению $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$, в котором получены самые точные значения отношений скалярного и тензорного формфакторов $K_{\pi^0}^+$:
 $|f_s/f^+(0)| = 0.070 \pm 0.016(\text{стат}) \pm 0.016(\text{сист})$
 $|f_t/f^+(0)| = 0.53_{-0.10}^{+0.09}(\text{стат}) \pm 0.10(\text{сист})$ [12].
8. Предложен, разработан и экспериментально проверен новый вид позиционно-чувствительного слоистого калориметра на основе измерения ионизационных потерь в сжатом газе. Калориметр отличается коротким временем отклика и способен работать в жестких радиационных условиях. Создана модель, и изучены характеристики электромагнитного калориметра, достигнуто энергетическое разрешение $\sigma_E/E = 15\%/\sqrt{E} + 30\%/E$ и координатное

разрешение $\sigma_x = 0.8$ мм при энергии электрона 26.6 ГэВ [11]. Предложенный вид калориметра стал основой разработок калориметров для области очень высоких скоростей в новых детекторных установках для ускорителей УНК, SSC, LHC.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. A.M.Artykov, G.S.Bitsadze, Yu.A.Budagov, A.M.Blik, V.Hlinka, V.V.Glagolev, I.A.Minashvili, A.A.Omelyanenko, E.Kladiva, V.M.Korolev, A.A.Semenov, S.V.Sergeev, B.Sitar, A.S.Solovyev, A.B.Yordanov, R.V.Tsenov, J.Spalek. "Accuracy of electromagnetic shower position determination by wide-gap drift chamber." *Nucl.Instr. and Meth. A251, (1986) p.61-66.*
2. A.M.Artykov, G.S.Bitsadze, Yu.A.Budagov, A.M.Blik, V.Hlinka, V.V.Glagolev, I.A.Minashvili, A.A.Omelyanenko, M.N.Omelyanenko, E.Kladiva, V.M.Korolev, P.Povinec, A.A.Semenov, S.V.Sergeev, B.Sitar, M.Seman, A.S.Solovyev, A.B.Yordanov, R.V.Tsenov, J.Spalek. "Recent advances in wide-gap drift chambers developing for the spectrometer HYPERON" *Acta Physica Slovaca vol. 36 (1986) no.4 p.255-265.*
3. Ю.А. Будагов, В.В. Глаголев, Э. Кладива, А.А. Омеляненко, А.А. Семенов, Б. Ситар, Й. Шпалек, А.М. Артыков: "Применение широкоазорных дрейфовых камер для регистрации частиц и электромагнитных ливней." *Труды Межд. симп. по координатным детекторам в физике высоких энергий, (Дубна 1987), ОИЯИ Д1 13-88-172, 1988.*
4. A.M.Artykov, Yu.A.Budagov, V.Hlinka, V.V.Glagolev, A.A.Omelyanenko, M.N.Omelyanenko, E.Kladiva, V.M.Korolev, P.Povinec, A.A.Semenov, S.V.Sergeev, B.Sitar, M.Seman, P.Yanik, A.B.Yordanov, J.Spalek. "How to use electrodeless drift chambers in experiments at accelerators" *Nucl.Instr. and Meth. A255, (1987) 493-500.*
5. А.М.Артыков, В.В.Глаголев, В.Глинка, Э.Кладива, Б.Ситар. "Параметры диэлектрика и формирование электрического поля в безэлектродных дрейфовых камерах" *Приборы и техника эксперимента, 1989, 1, с.66-70*

6. Yu.A.Budagov, V.V.Glagolev, A.A.Omelyaneko, A.A.Semenov, V. Hlinka, P.Povinec, B.Sitar, E.Kladiva, M.Seman, J.Spalek, A.M.Artykov. "Tests of a time projection chamber module with delay line readout." *Nucl.Instr. and Meth. A284*, (1989) p.433-438.
7. M.Chudy, V.Hlinka, P.Kubinec, R.Janik, K.Janko, L.Lucan, J.Masarik, I.Melo, M.Pikna, M.Plesko, P.Povinec, J.Stanicek, P.Strmen, J.Szarka, P.Vojtyla, Yu.A.Budagov, E.Kladiva, J.Rohac, A.A.Semenov, B.Sitar, F.Simkovic, E.Bellotti, Yu.A.Zdesenko, M.Seman, J.Spalek. "A proposal on double beta-decay investigation using a time projection chamber." *preprint UKJF-10/89, Bratislava, 1989*.
8. Г.С. Бицадзе, Ю.А. Будагов, В.В. Глаголев, Ю.Ф. Ломакин, С.Н. Малюков, А.А. Омеляненко, Н.А. Русакович, А.А. Семенов, Ю.Н. Харжеев, В. Глинка, П. Повинец, Б. Ситар, Э. Кладива, М. Семан, Й. Шпалец, А.Б. Йорданов, Л.Б.Литов, Р.В.Ценов, А.М.Артыков, В.М. Маннев, И.А. Минашвили, Р.Г. Салуквадзе, Д.И. Хубуа, А.Н. Захарченко. "Определение координат ствола электромагнитного ливня в годоскопическом калориметре с апертурой 2 м^2 ." *Приборы и техника эксперимента*, 1990, 2, с.70-74
9. P.Povinec, B.Sitar, E.Kladiva, M.Seman, J.Spalek, Yu.A.Budagov, A.A.Semenov. "A time projection chamber for double beta-decay experiments." *Nucl.Instr. and Meth. A293*, (1990) pp.562-568.
10. N.D.Giokaris, K.Goilianos, D.F.Anderson, S.Cihangir, A.Para, J.Zimmerman, D.Carlsmith, D.Reeder, Y.A.Budagov, D.M.Khazins, E.Kladiva, A.A.Kuritsyn, C.Amatuni, M.Morgan. "Proposal for the development of high pressure sampling gas ionization calorimetry for the SSC." *proposal Rockefeller University, New York 1990*.
11. D.M.Khazins, E.Kladiva, R.N.Krasnokutsky, L.L.Kurchaninov, A.A.Kuritchin, V.V.Sushkov, R.S.Shuvalov, A.N.Zakhartchenko. "Sampling gas ionization electromagnetic calorimeter." *Nucl.Instr. and Meth. A300*, (1991) pp.281-285.
12. S.A.Akimenko, V.I.Belousov, G.S.Bitsadze, A.M.Blick, Yu.A.Budagov, I.E.Chirikov-Zorin, G.A.Chlachidze, Yu.I.Davydov, V.P.Dzhelepov, A.A.Feshchenko, V.B.Flyagin, V.V.Glagolev, V.Hlinka, D.I.Hubua, A.B.Jordanov, Yu.N.Kharzheev, E.Kladiva, V.N.Kolosov, V.M.Kutin, L.B.Litov, Yu.F.Lomakin, L.K.Lytkin, S.N.Malyukov, V.M.

- Maniev, I.A.Minashvili, A.A.Oleynik, V.I.Romanovsky, N.A.Russakovich, N.L.Russakovich, A.A.Semenov, S.V.Sergeev, B.Sitar, A.S.Soloviev, J.Spalek, R.V.Tsenov, G.V.Velev, V.B.Vinogradov, A.G.Volodko. "Measurement of the $K \rightarrow \pi e \nu$ form factors" *Phys. Letters B 259* (1991) p. 225-228.
13. V.Hlinka, P.Povinec, B.Sitar, E.Kladiva, M.Seman, J.Spalek, A.G.Artukh, Yu.A.Budagov, A.A.Semenov, Yu.G.Teterev. "A time projection chamber for heavy ion physics." *Acta Physica Slovaca 41* (1991) No4. p.243-250.
14. A.G.Artukh, Yu.A.Budagov, V.Hlinka, K.Holy, E.Kladiva, V.A.Nikitin, A.A.Omelyanenko, P.Povinec, M.Seman, A.A.Semenov, B.Sitar, J.Spalek, Yu.G.Teterev. "Time projection chamber for experiments with heavy ions." *J. Phys. G.: Nucl. Part. Phys. 17, Suppl.* (1991) s.477-481.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 октября 1995 года.