

П-567

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 9849

ПОНТЕКОРВО

Джиль Брунович

РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
В ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ
ГЕЛИЕВЫХ СТРИМЕРНЫХ КАМЕР

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1976

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель -
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Юрий Александрович
ЩЕРБАКОВ.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Борис Анатольевич
ДОЛГОШЕИН,

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Адольф Иванович
МУХИН.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт атомной энергии (г. Москва).

Автореферат разослан " " 1976 г.

Защита диссертации состоится " " 1976 г.

в часов на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных
проблем Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна,
Московской обл., ЛЯП ОИЯИ, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А.БАТУСОВ

Начиная с 1971 года в Объединенном институте ядерных исследований и в Физическом институте Туринского университета (Италия) для систематического исследования процессов рассеяния пионов на ядрах гелия и углерода успешно используется созданная и развитая с участием автора методика самошунтирующихся гелиевых стримерных камер /1-4/.

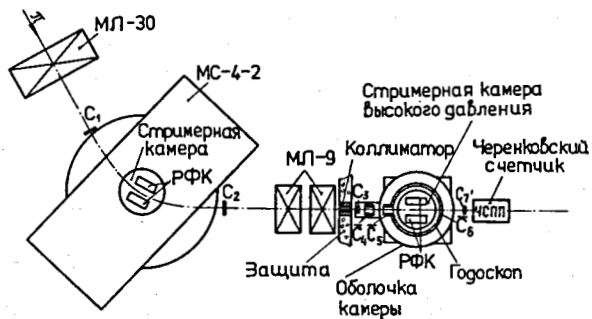
Основной особенностью режима самошунтирования является то, что локализованные следы получаются не за счет ограничения развития разряда в камере, а путем управления распределением интенсивности свечения разрядных каналов, расположенных вдоль траекторий частиц. Это достигается введением в рабочий объем камеры соответствующих примесей /1,2,5/.

Выбор нами гелия для наполнения стримерной камеры первоначально был обусловлен только необходимостью иметь камеру-мишень, в которой можно было бы фотографировать одновременно следы налетающего и рассеянного на ядре гелия пионов, а также след ядра отдачи и точку взаимодействия. Гелиевая стримерная камера высокого давления /3,4/ служила основным элементом установки для исследования рассеяния пионов на He^4 и He^3 . Для анализа импульсов пионов в первичном пучке использовалась гелиевая камера, помещенная в магнитное поле. Расположение установки на пучке пионов от мезонного тракта Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ показано на рис. 1а. Пионы, вылетающие из последней линзы МП-30 мезонного тракта, проходят через стримерную камеру, находящуюся в отклоняющем и анализирующем магните, и затем направляются через фокусирующую линзу МЛ-9 и коллиматор в основную камеру-мишень, т.е. в стримерную камеру высокого давления (СКВД). Общий внешний вид СКВД показан на рис. 1б.

Диссертация состоит из семи глав. В первой главе - введении дается краткий анализ задач, возникших при использовании в эксперименте гелиевой камеры-мишени.

Далее главы II-IV посвящены развитию качественного представления об образовании следа заряженной частицы в гелиевой стримерной камере и описанию экспериментов по созданию нового прибора - гелиевой самошунтирующейся стримерной камеры.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА



а) Расположение аппаратуры на пучке частиц



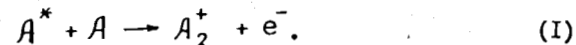
б) Общий вид установки с гелиевой стримерной камерой-мишенью

Рис. I

Вторая часть диссертации (главы V-VI) включает описание обработки камерных снимков и системы программ, написанных на языке FORTRAN и созданных специально для обработки на ЭВМ стереофотографий событий упругого τHe^3 - или τHe^4 - рассеяния в камере СКВД.

Во второй главе диссертации дается краткий обзор истории создания и развития техники стримерных камер. Несмотря на существенный прогресс в технике камер, в которых локализация следов достигается за счет искусственного обрывания разряда, тем не менее весьма серьезным недостатком "обычных" стримерных камер остается чрезвычайно малый световой выход, затрудняющий фотографирование с помощью обычных фотографических объективов и фотопленок. Особенно это относится к стримерным камерам, наполненным гелием и водородом. В связи с этим нами был разработан [1,6] специальный режим работы стримерной камеры (режим самошунтирования), позволивший получить хорошо локализованные и яркие следы заряженных частиц (рис. 2). Локализация следов частиц достигалась путем введения в камеру добавок ($\sim 0,01\%$) сложных углеводородов. При этом необходимость в специальном формировании высоковольтного импульса отпадает, а форма импульса напряжения на электродах камеры определяется разрядом в ней.

Третья глава посвящена качественному обсуждению процесса образования следа частицы в стримерной камере с точки зрения теоретических представлений, развитых в последнее время и подтвержденных экспериментами. Рассмотрен важный для понимания развития электрического разряда в газах вопрос о связи фотоионизации газа и первого коэффициента ионизации Таунсенда $\alpha^{(1)}$. Оказывается, что фотоионизация газа тесно связана с процессом ассоциативной ионизации:



Здесь A^* и A - соответственно возбужденный атом газа и атом, находящийся в основном состоянии. Это обстоятельство необходимо учитывать при вычислении первого коэффициента Таунсенда α при больших давлениях P (например, порядка атмосферного) газа. При этом нарушаются законы подобия относительно $\frac{E}{P}$, на основе которых определяются многие параметры газового разряда, в частности,

α (E - напряженность электрического поля). В диссертации приведена формула, позволяющая вычислить величину α с учетом реакции (I):

$$\frac{\alpha}{N} = \frac{\langle v \cdot \sigma_i \rangle}{U} + \frac{\langle v \cdot \sigma^* \rangle}{U} \cdot W. \quad (2)$$

Здесь N - концентрация нейтральных атомов или молекул газа, v - скорость электронов, U - дрейфовая скорость электронов, σ_i - сечение ионизации электронным ударом, σ^* - суммарное сечение возбуждения на уровни, находясь на которых, атом вступает в реакцию (I), и W - вероятность осуществления этой реакции до тушения возбужденного атома A^* без образования электрона; усреднение ведется по функции распределения электронов по скоростям. Полученное в диссертации выражение для W и соответственно для α и представленные результаты вычислений показывают, что степень отклонения от закона подобия при некоторых концентрациях может быть довольно велика. Отметим, что отклонения от закона подобия в газовом разряде наблюдались и экспериментально.

Далее, в третьей же главе диссертации довольно подробно рассмотрен вопрос об изменении напряжения на электродах стримерной камеры при распространении разряда в ней. Шунтирующее действие разряда в камере будет сказываться при распространении разряда по поверхностям стекол, отделяющих газовый объем камеры от электродов. Наиболее правдоподобно, что в этом смысле нельзя четко разделить процессы удлинения стримеров и распространения разряда по стеклам. Скорее похоже, что при достижении некоторой длины (порядка нескольких см) стримерный канал начинает ветвиться за счет фотоионизации, которая способствует тому, что все пространство внутри камеры будет постепенно заполняться проводящей плазмой одновременно с развитием самих стримерных каналов.

Поскольку стримерный канал является сложной фигурой вращения, то плотность тока в различных сечениях канала будет различной. Соответственно будут меняться и выделяемая энергия и яркость свечения канала. Для оценки распределения интенсивности свечения вдоль разрядного канала в камере важно знать его форму.

В диссертации предложена модель, описывающая начальную стадию развития стримера и учитывающая отличие формы поверхности стримера от эллипсоида вращения^{18/}.

В этой модели стример представлен как идеально проводящий канал с движущейся поверхностью. Скорость движения эквипотенциальной поверхности $\Phi=0$ определяется скоростью электронов в результирующем поле вблизи этой поверхности, а сам потенциал, создаваемый стримером в пространстве, задается уравнением Лапласа: $\Delta \Phi = 0$. Соответствующий выбор решения уравнения Лапласа позволяет, с учетом ранее развитой теории (Лозанский, Фирсов), получить зависимость ширины и скорости распространения стримера от его длины. Результаты вычислений находятся в хорошем качественном согласии с известными экспериментальными данными (Долгошеин и др., Руденко и Сметанин).

Существенным является то, что стримерный канал имеет в месте лавиностримерного перехода "шейку", т.е. узкое место, ширина которого определяется радиусом первичной лавины. В связи с этим, после замыкания разрядного промежутка стримерным каналом, плотность разрядного тока будет максимальна в области "шейки". Оценки показывают, что плотность электронов N_e в "шейке" может достигнуть величин порядка $10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$, в то время как вне "шейки" N_e значительно меньше. Это приводит к тому, что средняя энергия электронов в разряде определяется разными процессами в разных областях разрядного канала. В области "шейки" основную роль играют столкновения электронов с ионами, в то время как вне "шейки" средняя энергия электронов устанавливается за счет упругих столкновений с нейтральными атомами газа (в нашем случае гелия). Поэтому добавление примесей к гелию ведет к уменьшению средней энергии электронов в области вне "шейки". Такое уменьшение в свою очередь ведет к существенному уменьшению свечения канала в этой области, так как интенсивность спектральной линии пропорциональна $e^{-\epsilon/\epsilon^*}$, где ϵ^* - энергия возбуждения соответствующего уровня. В то же время средняя энергия электронов в области "шейки" при добавлении примеси практически не изменится, так как здесь она определяется уравнением баланса энергии, в которое не входят параметры столкновений электронов с нейтралами. Отметим, что подтверждением сделанных качественных

оценок служит отсутствие локализации следов в Ne с примесью Ne, так как частота упругих и неупругих соударений электронов с атомами Ne несколько меньше, чем у He, а потенциал возбуждения Ne достаточно высок $\sim 16,5$ эВ.

В четвертой главе диссертации подробно изложено содержание экспериментальных работ /9-II/, посвященных развитию методики самошунтирующихся стримерных камер. Были исследованы различные добавки к гелию, приводящие к локализации следов (CH_4 , H_2 , Xe, α -пинен, Ne, H_2O).

Эксперименты проводились со стримерной камерой диаметром 22 см с разрядным промежутком 7 см. Внутренний объем камеры отделен от электродов стеклянными пластинками толщиной 1,2 см, которые приклеивались клеем *Silicon rubber*. На электроды камеры непосредственно от генератора высоковольтных импульсов (типа генератора Аркадьева-Маркса) подавался импульс с передним фронтом около 10 нсек, временем спада $\sim 1,5$ миксек и амплитудой до 280 кВ. Запуск камеры осуществлялся с помощью одиночного сцинтилляционного счетчика, который регистрировал проходящие через камеру электроны, испускаемые источником Sr^{90} . Минимальная аппаратурная задержка высоковольтного импульса составляла 0,4 миксек. Для фотографирования следов электронов в камере использовалась пленка "тип 29" чувствительностью $S_{0.85} = 2000$ ед. ГОСТ.

Исследования характеристик самошунтирующейся стримерной камеры, наполненной гелием с малыми добавками паров воды показали, что такая смесь является оптимальной для получения ярких локализованных следов. Наряду с высокой степенью локализации следов такая смесь обеспечивает высокую стабильность качества следов частиц при многократных срабатываниях (более чем несколько десятков тысяч раз) камеры. При этом оказалось, что характеристики камеры меняются слабо при изменении количества добавки в широких пределах. На рис. 2а и 2б представлены фотографии следов электронов в чистом гелии и в смеси гелия и 0,1% паров воды, соответственно /10/.

При работе стримерной камеры в пучках частиц с большими интенсивностями существенную роль играет возможность регулирования времени памяти камеры. Возможность использования для этого CSe_4 исследовалась в работе /II/.

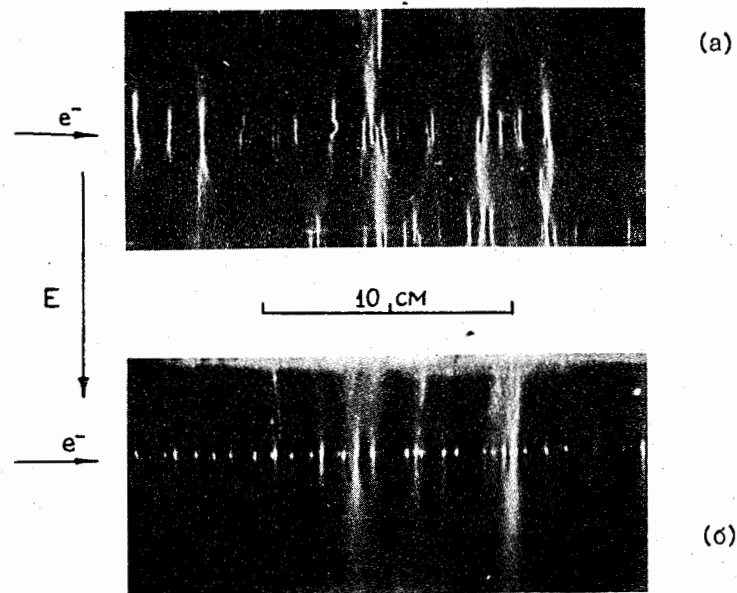


Рис. 2. След электрона в чистом гелии (а) и след электрона в смеси гелия и 0,1% паров воды (б)

Интересная особенность обнаружилась при исследовании стримерной камеры, наполненной гелием и примесью паров воды. Оказалось, что при наполнении самшунтирующейся стримерной камеры смесью гелия, паров воды и малых количеств воздуха память камеры остается неизменной (~ 0.7 мксек) в течение длительного промежутка времени. Качество следов при введении в камеру добавок воздуха также не меняется.

Возможность наполнения стримерной камеры-мишени другими газами, например, водородом или метаном и т.д. представляет несомненный интерес для проведения различных экспериментов. Так, камера, наполненная смесью гелия и метана ^{/12/}, может быть использована для изучения реакций останавливающихся заряженных мезонов с ядрами углерода. В диссертации приведены фотографии следов электронов в камере, наполненной гелием с различными добавками метана, и обсуждаются особенности развития разряда в смеси гелия и метана.

Очевидный интерес для изучения взаимодействий с протонами представляет возможность регистрации следов в водородной стримерной камере, которая могла бы работать одновременно в качестве мишени и детектора. Нам удалось сфотографировать следы электронов в водородной стримерной камере ^{/13/} при давлении газа вплоть до 1 атм и напряженности электрического поля, равной 27 кв/см. При этом качество следов, полученных в самшунтирующейся камере, не уступает качеству следов в обычных камерах (ЦЕРН), работающих при значительно более высоких напряженностях (до 70 кв/см).

В пятой главе диссертации описываются особенности работы самшунтирующейся стримерной камеры в магнитном поле. Само наличие магнитного поля приводит к ухудшению локализации следов, во всяком случае, при использовании обычных примесей углеводов для обеспечения хороших следов. Указанного недостатка, очевидно, лишены обычные стримерные камеры, на электроды которых подаются импульсы с длительностью 10+15 нсек. Выход из создавшейся ситуации был найден при поиске оптимальной концентрации добавки α -пинена и других более подходящих, чем углеводороды, примесей (He , N_2).

Точность в измерении радиусов кривизны следов в самшунтирующейся стримерной камере в магнитном поле сравнима с точностями, которые достигаются при использовании других трековых приборов.

Далее в диссертации описывается способ учета конического репроектирования камерных стереофотографий при определении импульсов заряженных частиц, движущихся в магнитном поле ^{/14/}. При этом по величине радиусов кривизны двух стереоизображений следов частиц на пленке определялся истинный радиус винтовой линии, по которой двигалась частица в камере. Изложенный метод был использован ранее при анализе импульсного спектра электронов, рождающихся при распадах мюонов: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$.

В главе шестой диссертации речь идет о процедуре обработки фотографий событий упругого πHe -рассеяния. На рис. 3 приведена фотография события πHe -рассеяния, полученная с помощью стримерной камеры высокого давления (СКВД), наполненной гелием до 4 атм.

Для обеспечения хорошего качества следов частиц и стабильности работы камеры мы добавляли к гелию различные примеси (углеводороды, вода, CCl_4). Действие малых количеств примесей на развитие разряда и формирование следов частиц в гелии при высоком давлении (до 6 атм) оказывается аналогичным действию при атмосферном давлении гелия.

Были обработаны фотографии, полученные в течение нескольких экспозиций камеры СКВД в пучке пионов. Соответствующие сведения частично приведены в табл. I.

Таблица I

Энергия пионов (МэВ)	Реакция	Дата экспозиции	Количество пленок	Общее число фотографий	Число обработанных событий
68	$\pi^- He^3$	16.02.73	25	51308	148
		14.12.73	28	68423	124
120	$\pi^+ He^4$	6.04.73	19	44372	544
		6.04.73	12	21844	197
145	$\pi^+ He^3$	18.01.74	17	36104	305
198	$\pi^- He^3$	12.04.74	14	31649	319
		12.04.74	11	26077	237

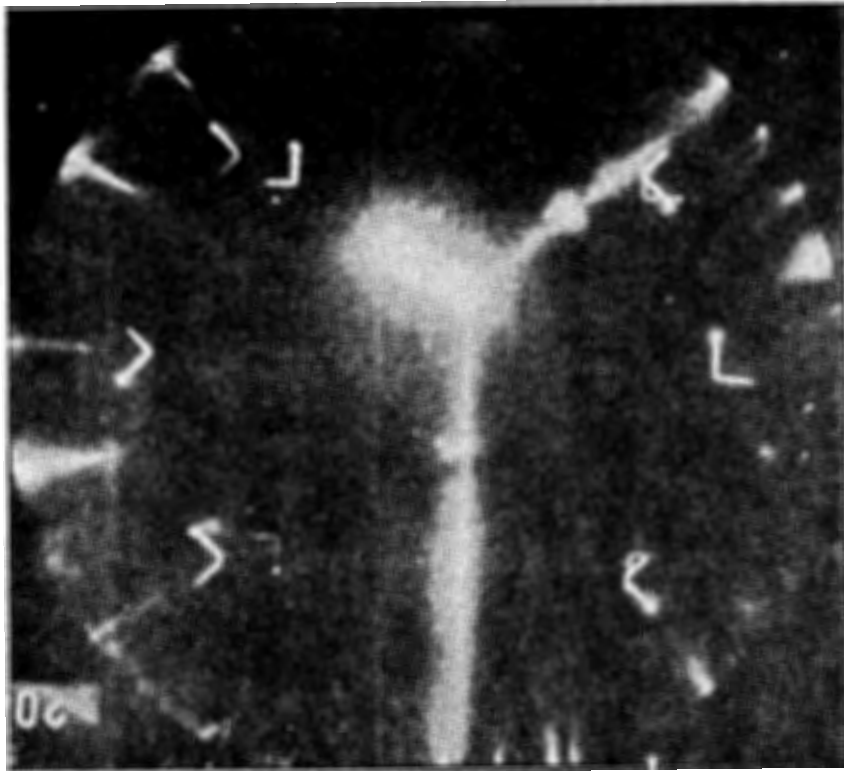


Рис.3.

фотография события упругого π He-рассеяния в стримерной камере высокого давления - СКВД. Давление гелия в камере $P = 4$ атм; расстояние между центральными реперными метками равно 300 мм.

На универсальном просмотрно-измерительном столе БПС-2 измерялись в определенной последовательности координаты изображений реперных меток и координаты пяти точек на изображениях следов каждой из трех частиц (падающего и рассеянного пионов и α -частицы).

В диссертации дается подробное описание пути следования информации о каждом событии после измерения на столе. Информация, записанная на магнитную ленту с помощью ЭВМ ТРА, расшифровывается и записывается на ленту в виде, удобном для обработки на ЭВМ СДС-1604А. Для этих целей нами была написана на языке FORTRAN-63 специальная программа ТРАТОСДС.

Далее информация, записанная на магнитной ленте, обрабатывается с помощью программы ORTICS, специально созданной нами для обработки стереоснимков событий, получаемых с камеры СКВД.

По существу программа ORTICS состоит из двух независимых подпрограмм, предназначенных для выполнения следующих видов работы: 1) вычисление положений оптических осей двух объективов относительно изображений реперных меток на каждой паре стереоснимков событий и последующее построение гистограмм по всем снимкам, проанализированным в течение данной работы. Результирующие гистограммы аппроксимируются кривыми Гаусса, и по средним значениям вычисляются расстояния между оптическими осями и реперами в пространстве камеры, а также расстояние от плоскости фотопленок до плоскости, в которой лежат верхние реперные метки. Все эти операции выполняются подпрограммами FIDUCL и PARAMET; 2) анализ первичного пионного пучка, геометрическая реконструкция событий упругого (π He)-рассеяния и построение различных экспериментальных распределений величин, характеризующих пучок пионов или процесс (π He)-рассеяния. Гистограммы учитывают те события, которые удовлетворяют соответствующим кинематическим и геометрическим критериям. Указанный анализ выполняется подпрограммой ELASTIC.

На рис. 4 в качестве иллюстрации работы программы ORTICS приведено суммарное угловое распределение пионов в π^+ He⁴ и π^- He⁴-рассеяния при энергии пионов 120 МэВ. На рис. 5 для π^- -мезонов приведено то же распределение /15,16/, но уже исправленное с учетом геометрической эффективности камеры СКВД и эффективности работы счетчиков сцинтилляционного годоскопа.

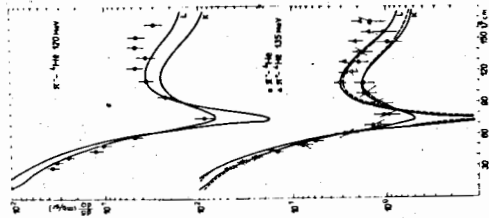


Рис. 5. Примеры окончательных угловых распределений, построенных с учетом геометрической эффективности СКБД. Кривые соответствуют теоретическим моделям.

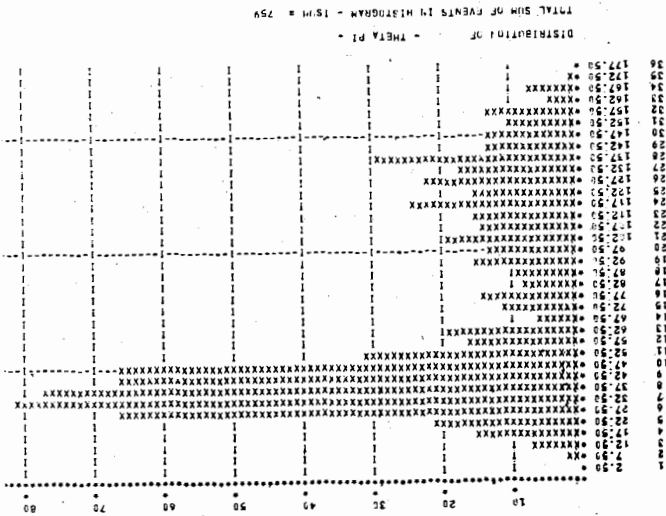


Рис. 4. Угловое распределение пиков (τ^- и τ^+) при упругом $\tau^- \text{He}^+$ -рассеянии. Распределение построено только по данным измерений и геометрической реконструкции событий $\tau^- \text{He}^+$ -рассеяния.

Основные результаты диссертационной работы сформулированы в последней главе - заключении и сводятся к следующему.

1. Реализован специальный режим работы гелиевых стримерных камер, позволяющий получить хорошо локализованные яркие следы заряженных частиц. Это достигается путем управления распределением интенсивности свечения разрядных каналов, расположенных вдоль траекторий частиц, за счет введения в рабочий объем камеры соответствующих примесей.

2. Дано качественное объяснение явления локализации следов в самошунтирующихся стримерных камерах. При этом выполнены расчеты, показывающие, что значительный вклад в величину первого коэффициента ионизации Таунсенда в газах дает явление ассоциативной ионизации вида $A^* + A \rightarrow A_2^+ + e^-$. Выполнены также расчеты формы стримерного канала в камере, позволившие дать качественные оценки распределения интенсивности свечения вдоль разрядных каналов в камере.

3. Проведены подробные исследования характеристик гелиевой самошунтирующейся стримерной камеры с различными примесями, позволившие дать "рецепт" реализации режима работы гелиевой камеры, при котором получают яркие и локализованные следы.

4. Показана возможность регулирования времени памяти стримерной камеры с помощью малых количеств электроотрицательных добавок. При этом достигнута стабильная работа камеры.

5. Показана возможность создания самошунтирующихся стримерных камер, наполненных смесью гелия и метана, а также водородом. Полученные нами следы электронов в водороде по степени локализации ничем не отличаются от следов, полученных группой ЦЕРНа. В то же время светимость следов в самошунтирующейся камере значительно больше.

6. Исследована работа самошунтирующейся гелиевой стримерной камеры в магнитном поле. Получены хорошо локализованные яркие следы частиц в камере. Проведена оценка точности определения импульсов частиц, движущихся в магнитном поле.

7. Описан расчетный метод учета конического репроектирования камерных стереофотографий при определении импульсов заряженных частиц, движущихся в магнитном поле. Указанный метод представляет интерес при использовании любого трекового детектора, работающего в магнитном поле.

8. Обработано несколько тысяч стереофотографий событий упругого рассеяния пионов на ядра He^4 и He^3 . Обработка велась на просмотрово-измерительных столах БПС-2. Создана серия программ, предназначенных для вычисления и контроля параметров системы фотографирования стримерной камеры высокого давления, анализа параметров пучка пионов и геометрической реконструкции фотографируемых событий. Созданные программы позволили получить дифференциальные сечения упругого рассеяния пионов на ядрах He^3 и He^4 при различных энергиях в районе резонанса Δ_{33} . Измерения на ядре гелия-3 выполнены впервые.

Настоящая диссертация написана по материалам опубликованных работ /1-16/. Часть работ представлялась на международные конференции в Дубне (1969 г.), Версале (1968 г.), Аргонне (1972 г.) и Эиндховене (1975 г.).

Литература

1. I.V.Falomkin et al., Nucl.Instr.and Meth., 53, 266 (1967).
2. F.Balestra et al., Nucl.Instr.and Meth., 125, 157 (1975).
3. И.В.Фаломкин и др. Международное совещание по бесфилмовым искровым и стримерным камерам, стр. 63 (Дубна, 1969).
4. I.V.Falomkin et al., Lett.Nuovo Cimento, 5, 757 (1972).
I.V.Falomkin et al., International Conference on Streamer Chamber Technology, Argonne, 1972, p. 121.
5. Л.Буссо и др., Сообщение ОИЯИ, П13-8268 (1974).
6. М.М.Кулюкин и др. Препринт ОИЯИ П13-3123, Дубна (1967).
7. Лозанский Э.Д., Понтекорво Д.Б. Письма АТФ, 1, вып. 22, 1034 (1975).
E.D.Lozański, G.B.Pontecorvo. Proc. of the XII International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Eindhoven, Netherlands, Part 1, page 92 (1975).
8. Э.Д.Лозанский, Д.Б.Понтекорво. АТФ, 46, 2322 (1973).

9. Л.Буссо, М.М.Кулюкин и др. Препринт ОИЯИ, П13-9131 (Дубна, 1975).

L.Busso et al. Nuclear Instr.and Meth., 131, N 3, 431 (1976).

10. Л.Буссо и др. Сообщение ОИЯИ, П13-9522, Дубна (1976).

11. Л.Буссо, Е.С.Годунова и др. Препринт ОИЯИ, П13-8267, Дубна (1975).

12. I.V.Falomkin et al. Colloque. Intern. sur l'Elektronique Nucleaire, vol. III, p. 8-11, Versailles, Sept., 1968.

13. I.V.Falomkin et al., Lett. Nuovo Cim., 13, N 11, 427 (1975).

14. Д.Б.Понтекорво. ПТЭ, 4, 66 (1964).

15. I.V.Falomkin et al., Nuovo Cimento, 21A, 168 (1974).

16. I.V.Falomkin et al., Nuovo Cimento, 24A, 93 (1974).

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июня 1976 года.