

C-759



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

539.2.073

539.12.17

1-83-397

СТАБНИКОВ

Марк Васильевич

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ
ИХ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА УСКОРИТЕЛЯХ**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1983

Работа выполнена в Ленинградском институте ядерной
физики им. Б.П.Константинова АН СССР

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук профессор	Михаил Иосифович СОЛОВЬЕВ
доктор физико-математических наук профессор	Павел Фёдорович ЕРМОЛОВ
доктор физико-математических наук профессор	Андрей Николаевич ГОРБУНОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Московский инженерно-физический институт.

Защита диссертации состоится 24 11 1983 г.
в 11 час. на заседании специализированного совета Д-047.01.02
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных
исследований, Дубна Московской области, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан 13 10 1983 г.

Ученый секретарь
специализированного совета *М.Ф.Лихачев* М.Ф.ЛИХАЧЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Разработка и создание новых детекторов ядерных взаимодействий является важным направлением экспериментальной ядерной физики, которое расширяет диапазон физических исследований и открывает новые возможности для более углубленного понимания строения материи. Новые методы регистрации процессов взаимодействия ядерного излучения с ядрами и материалами расширяют практические возможности использования атомной энергии, внедрения результатов научных исследований в народное хозяйство.

Значительный интерес в научном и практическом планах представляют исследования глубоконеупругих, многочастичных взаимодействий адронов и ядер с ядрами при промежуточных энергиях (несколько сотен МэВ) налетающих частиц.

Со времени появления первых ускорителей промежуточных энергий в разных лабораториях нашей страны и за рубежом выполнен большой объем исследований взаимодействий адронов с ядрами. Эти процессы до определенной поры непротиворечиво описывались каскадно-испарительной моделью адрон-ядерных взаимодействий.

Последовательное развитие исследований глубоконеупругих взаимодействий в последние годы позволило установить новые экспериментальные факты, связанные с рождением π -мезонов, тяжелых фрагментов, для которых общепринятая теоретическая интерпретация оказалась неприемлемой. Для проверки новых моделей, более глубоко и последовательно описывающих ядерные взаимодействия, были необходимы экспериментальные данные о ядерных расщеплениях, полученные на изотопно чистых ядерных мишенях со всесторонней регистрацией корреляционных зависимостей и характеристик продуктов взаимодействия.

Возможности существующих детекторов многочастичных ядерных взаимодействий не отвечали в полной мере современным требованиям и ограничивали диапазон экспериментальных возможностей исследователей. Для счетчиковых систем таким ограничением является низкая общая светосила многоканальных установок. Использование ядерных фотоэмульсий ограничено их сложным составом (восемь ядер и более четырнадцати изотопов) и высокой общей плотностью материала детектора (около 4 г/см^3), что затрудняет их широкое использование при работе в магнитном поле.

Для решения новых задач ядерной физики были необходимы новые де-

детекторы многочастичных ядерных взаимодействий с возможностями, существенно превосходящими существующие.

Начиная с 60-х годов необходимость исследования глубокоэластичных взаимодействий ускоренных протонов и ядер с ядрами возрастает. Это связано с началом освоения космического пространства, с созданием ускорителей, позволяющих ускорять ядра разной массы от энергий в несколько МэВ на нуклон до релятивистских энергий. Взаимодействия таких частиц с ядрами в своей основной части — глубокоэластичные, они сопровождаются многочастичными расщеплениями.

Новый теоретический подход к описанию глубокоэластичных взаимодействий адронов и ядер с ядрами при релятивистских энергиях стимулировал интерес к этой проблеме. В ряде лабораторий сформулированы и выполняются широкие программы исследований в области релятивистской ядерной физики.

Открытие в 70-х годах нестабильных, "очарованных" частиц с временами жизни 10^{-12} – 10^{-13} с также требовало создания новых прецизионных регистраторов многочастичных взаимодействий, которые могли бы обеспечить измерение времен жизни новых частиц и каналов их распада.

Наконец, в последнее время разрабатываются альтернативные программы получения ядерной энергии за счет электроядерных процессов и μ -катализа. Все названные области исследований остро нуждаются в точной информации о глубокоэластичных, многочастичных ядерных взаимодействиях.

Во многих научных центрах разных стран постоянно ведутся поисковые исследования, направленные на создание новых трековых детекторов и на совершенствование существующих.

В связи с изложенным разработка, создание новых детекторов многочастичных взаимодействий, отвечающих по своим возможностям современным требованиям, и внедрение их в практическую работу на ускорителях является актуальной проблемой, имеющей важное значение для решения научных и практических задач сегодняшнего дня и для подготовки к исследованиям на ускорителях нового поколения в будущем.

Основные цели данной работы могут быть изложены следующим образом:

I. Разработка и создание нового типа детекторов ядерных взаимодействий, обеспечивающих регистрацию многочастичных, глубокоэластичных процессов на чистых ядерных мишенях на основе гибридной системы, включающей вершинный детектор, регистрирующий центр расщепления и детектор быстрых частиц, пробеги которых не уложились в детекторе центра расщепления.

2. Разработка и создание новых типов вершинных детекторов, в том числе на основе применения лазерного излучения и голографии, позволяющих регистрировать ядерные взаимодействия с высоким пространственным разрешением в широком угловом и энергетическом диапазонах. Анализ основных процессов, определяющих главные характеристики и возможности нового способа регистрации треков как прозрачных оптических неоднородностей.

3. Проведение исследований с новыми детекторами на ускорителях. Получение первой физической информации о нуклон-ядерных взаимодействиях при промежуточных энергиях на чистых ядерных мишенях.

Научная новизна и практическая ценность работы. Диссертация содержит итоги работы автора, направленной на создание новых типов трековых детекторов и их применение в работе на ускорителях. Исследования проводились в течение 1963–1982 годов и опубликованы в работах ^{1-40/}. В них изложено описание новых предложений автора и приведены практические результаты, полученные при создании аппаратуры на новой основе, а также результаты практического применения новых детекторов в работе с ускорителями.

При выполнении работы предложен, разработан и создан новый уникальный трековый детектор — гибридная газожидкостная камера. Создание этого прибора открыло новую возможность для исследования ядерных расщеплений на чистых ядерных мишенях в условиях минимального фона посторонних реакций.

С участием автора работы сформулировано предложение о создании следовых регистраторов нового типа — голографических трековых детекторов. Это предложение в ходе работы доведено до практической реализации — создана и испытана в работе с ускорителем первая голографическая пузырьковая камера, зарегистрированы в виде голограмм и восстановлены с них изображения треков заряженных частиц.

Автором работы в 1968 году впервые сформулировано и обосновано положение, из которого следует возможность создания голографических трековых детекторов, в частности пузырьковых камер высокого разрешения с рабочим объемом, значительно превосходящим объем фотографических камер с таким же разрешением.

Это положение было практически подтверждено в цикле экспериментов с реальными пузырьковыми камерами малого размера. Получены и восстановлены голограммы треков заряженных частиц с числом элементов более 100 на одном сантиметре пробега частицы.

С участием автора сформулировано предложение о создании лазерных стримерных камер с регистрацией треков в виде голограмм и тенеграм.

На этой основе после серии модельных экспериментов с искровыми зарядами была создана, оснащена необходимой лазерной техникой и управляющей мощной наносекундной электроникой новая установка - лазерная стримерная камера в магнитном поле. На этой же основе решена задача создания лазерной стримерной камеры, работающей в обычных условиях при наполнении её чистым водородом.

Разработан новый способ стереотенеграфирования лазерных стримерных камер. Этим методом получена первая информация о расщеплениях ядер углерода протонами с энергией 1 ГэВ на синхротроне ЛЯФ.

Проанализированы возможные пути обработки информации о треках в следовых детекторах, зарегистрированных в виде голограмм. Создан и испытан первый действующий макет установки, предназначенной для восстановления и обмера голограмм, полученных при регистрации следов в трековых детекторах.

Практические результаты, обеспечивающие создание новых детекторов, позволили сформулировать программу исследования глубокоэластичных процессов на новой основе и приступить к её исполнению на синхротроне ЛЯФ. Первые результаты исследования глубокоэластичных расщеплений ядер ^{40}Ar протонами (1 ГэВ), полученные с участием автора диссертации, опубликованы и широко обсуждаются специалистами.

Реализация основных положений диссертационной работы в виде действующих установок, внедрение их в практику работы на ускорителях, анализ их практических возможностей стимулировали исследования по данному направлению во многих лабораториях в нашей стране и за рубежом. При этом изучаются возможности метода, способы обработки голографической информации, разрабатываются оптимальные условия регистрации треков, создаются новые установки, предназначенные для конкретных исследований на ускорителях. Результаты этой работы обсуждались на специальных совещаниях в США, Англии, Франции.

В настоящее время работы в области голографических трековых детекторов ведутся в нашей стране, а также в ряде лабораторий стран-участниц ОИЯИ, а также в ЦЕРНе, в Англии, Швеции, Японии, США при признании приоритета предложений, исследований и разработок в этой области автора диссертационной работы.

На защиту выносятся следующие положения:

I. Метод создания высокоэффективных детекторов, предназначенных для изучения глубокоэластичных ядерных взаимодействий, заключающийся в функциональном объединении трековых детекторов с дополняющими друг друга возможностями в единый регистрирующий комплекс - гибридный трековый детектор.

2. Реализация нового метода в виде созданной гибридной газожидкостной камеры, основой которой является тяжелогазостная 150-литровая камера, заполненная фреоном, в рабочем объеме которой размещен вершинный детектор - двухлитровая герметизированная камера Вильсона, заполненная газом - ядерной мишенью.

3. Способ создания трековых детекторов нового типа, расширяющий возможности известных следовых регистраторов. Сущность его заключается в регистрации следов трековых детекторов как прозрачных оптических неоднородностей с применением излучения лазеров и голографии.

4. Метод создания пузырьковых камер с высоким разрешением за счет сочетания применения голографии, специального режима расширения камеры и освещения треков.

5. Экспериментальное подтверждение работоспособности первой голографической пузырьковой камеры совместно с ускорителем.

6. Предложение и экспериментальное обоснование модельными экспериментами возможности создания лазерной стримерной камеры с регистрацией треков в виде голограмм и тенеграм. Создание действующей установки - лазерной стримерной камеры в магнитном поле и исследование её возможностей в реальной работе с ускорителем.

7. Результаты теоретического анализа главных процессов, определяющих основные характеристики лазерного метода регистрации треков частиц в стримерных камерах.

8. Экспериментальное подтверждение расчетного предсказания возможности расширения набора рабочих газов, пригодных для наполнения лазерных стримерных камер, в том числе чистым водородом, метаном, аргоном.

9. Экспериментальное доказательство возможности получения информации о глубокоэластичных взаимодействиях на чистых ядерных мишенях на основе результатов исследования расщеплений ядер ^{40}Ar протонами (1 ГэВ), где получены угловые, энергетические, корреляционные характеристики продуктов глубокоэластичных взаимодействий.

10. Рабочий вариант конструкции пузырьковой камеры с трекочувствительным объемом, выполненным в виде тонкого плоского диска (листовая камера). Установка предназначена для дефектоскопических исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения.

Во введении сформулирована проблема, решению которой посвящена

диссертационная работа. Она связана с исследованием глубоконеупругих многочастичных ядерных процессов в области промежуточных энергий налетающих частиц. Результаты исследований ядерных взаимодействий в этой области энергии имеют важное значение с научной и практической точек зрения.

Анализ экспериментальных исследований, выполненных за последние годы, новые теоретические исследования требуют от экспериментаторов новых и более детальных результатов о глубоконеупругих адрон-ядерных взаимодействиях на изотопно чистых ядерных мишенях. Это же требование в сочетании с высокой точностью регистрации следовой информации возникает при регистрации и исследовании времени жизни и каналов распада новых нестабильных частиц с временами жизни 10^{-12} - 10^{-13} с. Возможности существующих методов регистрации многочастичных расщеплений не могут в полной мере обеспечить решение этой задачи. Такая ситуация стимулирует исследования, направленные на разработку и создание новых детекторов ядерных взаимодействий с рабочими характеристиками, превосходящими характеристики существующих регистраторов.

Первая глава носит обзорный характер. Она посвящена анализу многочисленных работ исследователей в разных лабораториях в нашей стране и за рубежом, направленных на разработку и создание новых детекторов для регистрации глубоконеупругих, многочастичных ядерных взаимодействий.

После создания в конце сороковых годов в ряде стран синхротронов исследования глубоконеупругих взаимодействий были начаты во многих лабораториях. Изучался состав вторичных частиц, их энергетические и угловые распределения. Основным прибором для таких исследований служили ядерные фотоэмульсии. Известные ограничения этого метода побуждали исследователей искать пути для проведения экспериментов с чистыми мишенями и возможно более полным анализом продуктов ядерных расщеплений.

Часть исследователей пыталась приспособить известные приборы, в том числе камеры Вильсона, пузырьковые, диффузионные камеры для исследований ядерных расщеплений без каких-либо переделок. Ограниченные возможности этих приборов не позволили вести полноценный анализ характеристик продуктов взаимодействия в необходимом диапазоне. Для исследований малолучевых расщеплений были использованы стримерные камеры, работающие в режиме самошунтирования.

Положительные результаты были достигнуты при развитии метода ядерных фотоэмульсий. Методом адсорбции либо путем примешивания чистых материалов в них вводились ядерные мишени, что позволило с определенными трудностями при анализе выполнить первые эксперименты на

чистых ядерных мишенях - уране, углероде и некоторых других ядрах. Значительным усовершенствованием метода ядерных фотоэмульсий является разработка новых трекочувствительных плёнок на основе кристаллов из $AgCl$. Хотя число разных ядер в новых детекторах уменьшилось по сравнению с фотоэмульсиями, все ограничения возможностей новых детекторов остались прежними.

В 1965 году был предложен способ регистрации ядерных многочастичных взаимодействий в полном объёме на основе ядерной фотоэмульсии как мишени в объёме пузырьковой камеры^{1/1}. Установка такого рода несомненно расширяет возможности изучения процессов ядерного взаимодействия, однако для решения задач ядерной физики, требующих определённых и разных ядерных мишеней, было необходимо другое, более полное решение стоящей задачи.

Таким образом, в экспериментальной ядерной физике к 70-м годам сложилась серьёзная проблема. Для её решения было необходимо разработать и создать новые трековые детекторы, обеспечивающие возможность высокоэффективных исследований многочастичных ядерных реакций.

Требовалось, чтобы новые детекторы обладали следующими качествами:

- обеспечивали возможность проведения исследований на чистых, в том числе моноизотопных, ядерных мишенях;
- обладали высоким пространственным разрешением;
- регистрировали все заряженные продукты ядерных взаимодействий в широком энергетическом и угловом интервалах;
- работали в магнитном поле для обеспечения анализа зарядового состава продуктов реакции.

Настоящая работа посвящена решению экспериментальной проблемы: разработке, созданию и исследованию возможностей при работе на ускорителях новых трековых детекторов, удовлетворяющих поставленным требованиям.

Основой для решения проблемы является предложение автора работы о создании для регистрации многолучевых ядерных взаимодействий сложных (гибридных) систем, состоящих из детектора вершины расщепления и детектора быстрых частиц, которые связаны между собой функционально и по своим характеристикам дополняют друг друга.

Для регистрации вершин взаимодействия предложено использовать как известные способы в виде камеры Вильсона специальной конструкции, так и новый способ регистрации треков в следовых детекторах. Новый способ заключается в детектировании следов в трековых детекторах как прозрачных оптических неоднородностей с применением когерентного излучения лазеров и голографии.

Экспериментальное развитие этих предложений, обеспечивающее решение стоящей проблемы, составляет содержание последующих глав диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию базовой установки - 130-литровой тяжеложидкостной пузырьковой камеры, предназначенной для работы с мишенями. Установка создана для изучения взаимодействия частиц, ускоряемых на синхротронном ускорителе ЛЯФ, с ядрами. Это определило её размеры и величину магнитного поля в магните МС-12, в котором она размещена во время работы на ускорителе^{2/}.

Размеры фотографируемого рабочего объёма равны $800 \times 400 \times 400$ мм³. При наполнении камеры смесью фреонов I3 и I3Б-I импульс наиболее быстрой частицы от ускорителя - протона с энергией 1 ГэВ, равный 1690 МэВ/с, может быть измерен с точностью не хуже 15%. Камера сконструирована для работы с внутренними мишенями в виде труб с газовым наполнением, ядерных фотоэмульсий и специальных трекочувствительных следовых детекторов.

Магнит МС-12 реконструирован. Он оборудован поворотной платформой, которая обеспечивает возможность его разворота на $\pm 15^\circ$ от основного направления, что позволяет вводить в рабочий объём камеры ускоренные частицы в диапазоне импульсов от 400 до 1700 МэВ/с.

Конструкция тяжеложидкостной пузырьковой камеры приведена на рис. I. Приведем описание некоторых наиболее характерных узлов установки.

Корпус камеры изготовлен из нержавеющей стали IX18Н10Т. Камера испытана на давление около 100 ат, что позволяет использовать её для работы с пропаном, фреонами и жидкой углекислотой. Расширительный механизм с газовым приводом создан без водяного буфера. Такая конструкция обеспечила наибольшую однородность магнитного поля в рабочем объёме камеры и потребовала большой тщательности изготовления всех узлов пневмопривода камеры.

Особенностью конструкции камеры является устройство крепления рабочего защитного стекла с размером $850 \times 440 \times 440$ мм³ и стекол в окнах для фотографирования. Они собраны в единую систему и отъюстированы на общем несущем корпусе - колпаке противодавления. Эта особенность камеры обеспечивает сохранность основной юстировки оптической системы при установке и отлаживании внутренних мишеней.

В переднем торце корпуса камеры находится окно с размером 180×70 мм². Окно предназначено для ввода пучка и освещения внутренних мишеней пузырьковой камеры. Внутри камеры окно имеет специальный фланец, предназначенный для крепления мишеней или заглушки с тонкостенным окном.

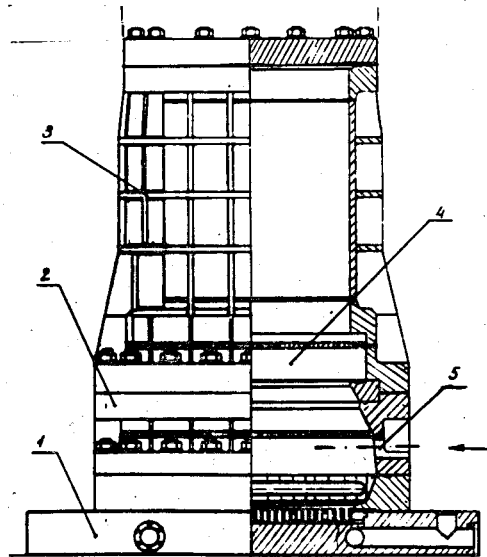


Рис. 1. Конструкция тяжелойжидкостной пузырьковой камеры: 1 - основание камеры; 2 - корпус рабочего объема; 3 - колпак противодавления; 4 - основное защитное стекло камеры; 5 - окно для ввода частиц и освещения рабочего объема камеры-мишени.

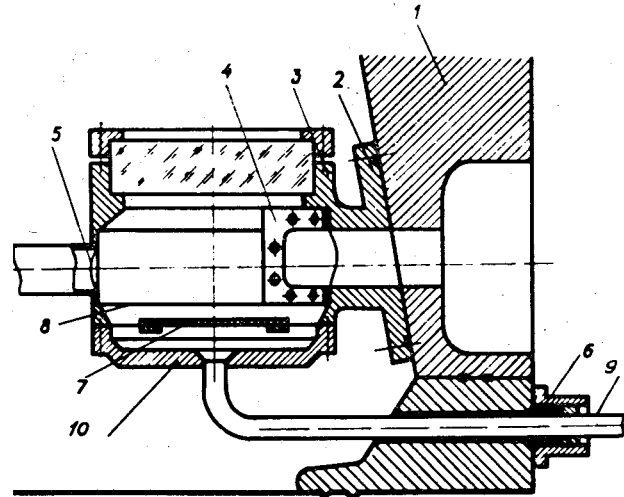


Рис. 2. Конструкция камеры-мишени: 1 - фланец пузырьковой камеры; 2 - фланец камеры мишени; 3 - корпус камеры-мишени; 4 - фланец для крепления окна из лавсана; 5 - заглушка ионопровода; 6, 7, 8, 9 - детали расширительной системы; 10 - дно камеры-мишени.

В объёме пузырьковой камеры размещена камера Вильсона - вершинный детектор с автономной системой расширения и освещения. Камера Вильсона рассчитана на работу при внутреннем давлении 3 ат и наружном давлении около 30 ат. Схема камеры-мишени приведена на рис.2. Рабочий объём её имеет диаметр 220 мм, высота - 100 мм.

Обеспечение работоспособности гибридной системы потребовало решения сразу нескольких новых специфических задач.

Одна из них - пропуск потока частиц через объём камеры при минимальном фоне посторонних ядерных реакций. Это достигнуто выбором конструкции вводного окна камеры и созданием ионопровода в рабочем объёме пузырьковой камеры.

Другая проблема - температурная совместимость двух камер. Для того чтобы в камере Вильсона был минимальный фон, её температура не должна быть выше 20°C. Тяжеложидкостные камеры обычно работают при больших температурах. Решение вопроса было найдено путём подбора смеси фреонов, наполняющих пузырьковую камеру. Смесь Ф-13 - 30% и Ф-13Б1 - 70% позволяет выбрать рабочую температуру около 20°C.

И наконец, проблема регистрации картины ядерного взаимодействия в гибридной камере, которая выполнялась единой фотографической системой, включающей три фотоаппарата.

В связи с тем, что треки в пузырьковой камере и камере Вильсона растут с разной скоростью, для их освещения были использованы независимые системы освещения. Задержка времени фотографирования пузырьков в пузырьковой камере - 3 мс, а капель в камере Вильсона - 100 мс. Дополнительная сложность регистрации единой картины расщепления в разных камерах на одну фотоплёнку - разные величины и природа элементов треков в пузырьковой и камере Вильсона. Размеры пузырьков - 300-400 мкм, а капель при нашем режиме работы - около 100 мкм. Естественное решение этих трудностей при фотографировании найдено из анализа выражения для величины относительного отверстия $\mathcal{E}_{КП,В}$ объектива при фотографировании объёма камер:

$$\mathcal{E}_{КП,В} = 2(1 + \beta_0) \sqrt{\frac{\rho \lambda}{\pi \Delta'_{КП,В}}}$$

где β_0 - коэффициент увеличения; ρ - величина фазовой дефокусировки; λ - средняя величина длины волны осветителя; Δ' - величина дефокусировки в пространстве изображения.

В связи с тем, что величина $\Delta'_{КВ}$ при фотографировании камеры Вильсона в три раза меньше, чем при фотографировании пузырьковой камеры $\Delta'_{КП}$, то для сохранения величины фазовой дефокусировки и яркости изображений элементов трека при фотографировании камеры Вильсона

следует увеличить значение величины относительного отверстия объективов $\mathcal{E}_{КВ}$.

В наших условиях величины относительных отверстий всех объективов менялись автоматически за 60 мс после фотографирования пузырьковой камеры до фотографирования камеры Вильсона от $A = 40$ ($\mathcal{E}_{КП} = 0,025$) до $A = 21$ ($\mathcal{E}_{КВ} = 0,048$).

Вся последовательность срабатывания исполнительных механизмов гибридной камеры и ускорителя обеспечивается схемой управления. Она является, по существу, целевым процессором с "защитой" в него программой исполнения рабочих операций. Выходы электронных логических блоков связаны с усилителями мощности и исполнительными механизмами электрического или пневматического типа, которые обеспечивают срабатывание в нужный момент каждого узла установки. Управление синхротроном при работе на пучке также осуществляется схемой управления камерой. Схема управления обеспечивает "привязку" момента сброса пучка от ускорителя с точностью несколько десятков микросекунд к определённому месту кривых изменения давления в жидкостной и газовой камерах.

Для повышения эффективности использования пучка ускорителя радиотехнической службой Ускорительного отдела ЛЯФ разработан режим работы синхротрона, позволяющий вести одновременную работу гибридной камеры с нейтронным спектрометром.

После завершения создания установки в 1974 году и пуска её на пучке синхротрона её конструкция была защищена авторским свидетельством^{/3/}, а основные материалы об её устройстве и возможностях описаны в публикациях^{/4,5,6/}.

В третьей главе излагаются результаты поисковых исследований, направленных на разработку и создание нового способа регистрации информации в трековых детекторах с применением излучения лазеров и голографии.

Возможности вершинных детекторов с газовым наполнением ограничены. Низкая плотность газа ограничивает возможность исследования ядерных взаимодействий с малыми сечениями.

Представляет большой интерес использование пузырьковых камер в качестве вершинных детекторов, однако их возможности ограничены высокой плотностью детектирующей среды, которая не позволяет вести исследования продуктов взаимодействия с низкими энергиями и пробегами, меньшими 0,5 - 1,0 см. Это обстоятельство закрывает возможность исследования ядерных взаимодействий при промежуточных энергиях с помощью пузырьковых камер, работающих в общепринятом режиме.

В работе^{/7/}, выполненной с участием автора диссертации, предло-

жен путь расширения возможностей трековых детекторов, включающий пузырьковые камеры.

Практически все трековые детекторы представляют собой ограниченный объём, заполненный прозрачным для света (в видимом диапазоне частот) материалом — газом или жидкостью, в котором после прохождения заряженной частицы в силу тех или иных физических процессов остается "дорожка", отражающая путь частицы в объёме регистратора. Элементы "дорожки" или трека частицы, как правило, тоже прозрачны, существуют короткое время, а по своим оптическим свойствам отличаются от материала, заполняющего детектор. Например, капли в камере Вильсона, пузырьки в пузырьковой камере, стримеры в стримерной камере и т.д.

Нами предложено регистрировать треки в следовых детекторах как прозрачные оптические неоднородности в прозрачной среде с применением для этого когерентного излучения лазеров и голографии.

Далее в диссертации кратко излагаются основные — интерференционный и теневой — способы регистрации оптических неоднородностей, которые интенсивно развиваются в последнее десятилетие в связи с работами в области аэродинамики, физики плазмы, динамики взрывных процессов. Анализ основных способов регистрации прозрачных оптических неоднородностей (ПОН) с применением традиционной аппаратуры — интерферометров, приборов Тейлера и т.д. позволил сделать вывод о том, что в наших условиях, в которых важным моментом является относительная простота и высокая чувствительность аппаратуры к резким изменениям коэффициента преломления у регистрируемого объекта, целесообразно на первом этапе исследований применить теневой метод регистрации ПОН.

Это означает, что для нас наибольший практический интерес представляют схемы получения и восстановления голограмм по способу Габорра.

Общее выражение для амплитуды светового поля W , прошедшего через голограмму при её восстановлении при габоровской схеме голографирования, имеет вид

$$W = r_0^2 (r+a) + r_0^2 \frac{a_0^2}{r_0} \exp(i\varphi_r) + r_0^2 \exp(i2\varphi_r) a^*$$

r — амплитуда падающего светового потока, $r_0 = rr^*$; a — амплитуда, содержащая информацию об объекте; φ_r — фазовая характеристика структуры объекта.

Первый член этого выражения описывает формирование действительного изображения. Третий член, пропорциональный a^* , — мнимого. Второй член отражает фон на восстановленном изображении, который обычно ограничивает возможности применения габоровских схем голографирования и заставляет пользоваться схемами Лейта и Упатникса с отдельным опорным пучком.

В наших же условиях, когда регистрируются малые неоднородности в ограниченных количествах, величина $\frac{a_0^2}{r_0} \ll 1$, и поэтому влияние фона мало сказывается на качестве восстановленных голограмм. Помимо этого имеется несколько способов борьбы с фоном от сопряженных изображений.

Далее в главе описаны экспериментальные исследования возможностей и условий регистрации статических и динамических ПОН в конденсированных и газовых средах с применением техники голографирования.

Автором с сотрудниками создан один из первых в стране аппаратных комплексов, позволивших выполнить исследования по названной программе.

Главное требование к аппаратуре, создаваемой для получения голограмм треков заряженных частиц, — обеспечение достаточно высокой величины фактора V — видности голограммы:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

I — интенсивность света, формирующая голографическую решетку. Она определяет величину светопропускания решетки в мин. и макс. её по чернения $t(I) \sim KI$ и её, таким образом, дифракционную эффективность.

Изложенное определило программу выбора и настройки элементов, входящих в схему голографирования, в первую очередь лазера, фотопленки, специального стола и набора оптических элементов.

Для голографирования статических ПОН был использован He-Ne лазер ОКГ-II мощностью 2 мВт с длиной волны $\lambda = 632$ нм. Была выполнена селекция поперечных мод колебаний, которая обеспечила ширину полосы излучения $\Delta\nu$, близкую к 1500 МГц. При этих условиях длина когерентности излучения лазера l равна

$$l \approx \frac{0,32 \cdot c}{\Delta\nu} = 6 \text{ см.}$$

Для регистрации голограмм была выбрана фотопленка "Микрат-600". Для её оптимальной засветки на среднем уровне плотности необходима энергия 100 мкДж/см². Это означает, что для голограммы с размером 10x10 см² необходима экспозиция с нашим лазером около 10 с. Это обстоятельство определило жесткие требования к конструкции платформы для голографирования. За время голографирования недопустим сдвиг голограммы на величину, превышающую $0,5\lambda$. Стол для голографирования был изготовлен в виде тяжелой стальной платформы, размещенной на четырех накачанных автомобильных баллонах.

Одним из важных требований к пленке является разрешение. Оно определяется длиной волны и схемой голографирования.

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta},$$

где d – шаг голографической решетки; θ – максимальный угол между лучами, интерферирующими на голограмме; λ – длина волны излучения. При выборе пленки необходимо кроме разрешения обеспечить её сенсбилизацию, соответствующую длине волны лазера, и связанную с ней светочувствительность.

В первой серии экспериментов, описанных в работах [8,9,10], в качестве объектов голографирования были выбраны:

А. Пузыри в стеклянном блоке.

$\Delta n = 0,33$ – разница в коэффициентах преломления;

$V = 100 \text{ см}^3$ – голографируемый объем;

$\delta = 0,01 - 0,5 \text{ см}$ – размер неоднородности (пузыря).

Б. Воздушная полость, прилегающая к нагретой до 300°C проволоке.

$\Delta n = 0,003$;

$V = 50 \text{ см}^3$;

$\delta = 1 - 3 \text{ см}$.

Были зарегистрированы голограммы объектов А и Б и восстановлены в свете He-Ne лазера. В работе приведены фотографии восстановленных изображений.

На основании анализа полученных результатов в диссертации сделан вывод о применимости предложенного метода для регистрации статических ПОН, а также показана возможность последовательного анализа расположенных в пространстве объектов по их изображениям, восстановленным с голограммы. В принципе, эта возможность позволяет увеличить загрузку голографируемых следовых детекторов первичным пучком при экспозиции на ускорителях.

Продолжая исследования, было необходимо установить возможность получения и восстановления голограмм подвижных или динамических объектов. Окончательный ответ на вопрос о возможности голографирования пузырьковых камер мог быть дан только после экспериментов на реальном приборе.

Определенный интерес к такому эксперименту был связан с работами автора, в которых было сделано и обосновано предложение о возможности работы голографической пузырьковой камеры в специальном режиме с высоким разрешением и по сравнению с фотографическими камерами большим рабочим объемом.

Была известна зависимость плотности пузырьков на треке заряженной частицы в пузырьковой камере от её рабочей температуры T , перегрева при расширении Δp и времени роста пузырей t . Она иллюстриру-

ется графиком, приведенным на рис.3. Из графика видно, что, увеличивая перегрев Δp в пузырьковой камере, наполненной пропаном от 8 до 12 ат, и сокращая время роста пузырей от 1 мс до 0,1 мс, можно увеличить их плотность в несколько десятков раз. Необходимое разрешение по объему камеры было предложено обеспечить за счёт применения для регистрации треков голографии.

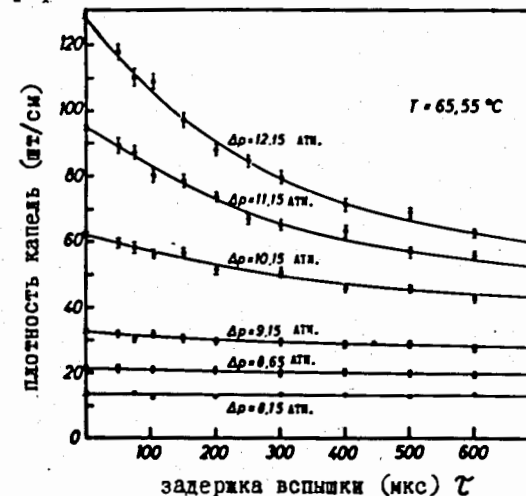


Рис. 3. Экспериментальная зависимость плотности пузырей в пропановой камере от глубины расширения (Δp) и времени задержки фотографирования (τ).

На основе модели, развитой А.А.Пистолькорсом для описания процесса записи и восстановления голограмм*, была рассчитана величина области с разрешением (в плоскости, параллельной голограмме) не хуже 50λ для рубинового лазера. Очертание её границ приведены на рис.4. Используя данные графика, можно определить, что она равна для голограммы $5 \times 5 \text{ см}^2$ $\Gamma_r = 100 \text{ см}$. При фотографировании величина глубины резкости в пространстве предметов с теми же условиями Γ_φ равна

$$\Gamma_\varphi \approx \frac{3,3 R^2}{\lambda} = 2 \text{ мм}.$$

Оценки показывают, что при голографировании мы можем иметь пятидесятикратный выигрыш в величине регистрируемого объема.

В 1968 году в ФТИ автором и сотрудниками была разработана и создана первая голографическая пузырьковая камера с объемом 0,5 литра. Она была испытана в работе с импульсными рентгеновскими трубками, источником ^{60}Co , синхротроном ДИЯФ/13/.

Главное требование к схеме голографирования динамических, то есть

* А.А.Пистолькорс. ДАН СССР, 1967, т.172, № 2, с.334.

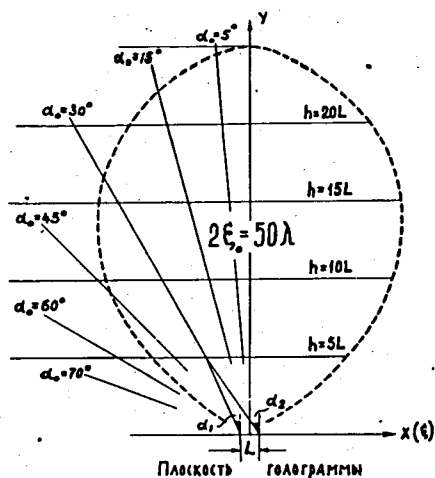


Рис. 4. Разрешающая способность голограммы в соответствии с моделью А.А.Пистолькорса.

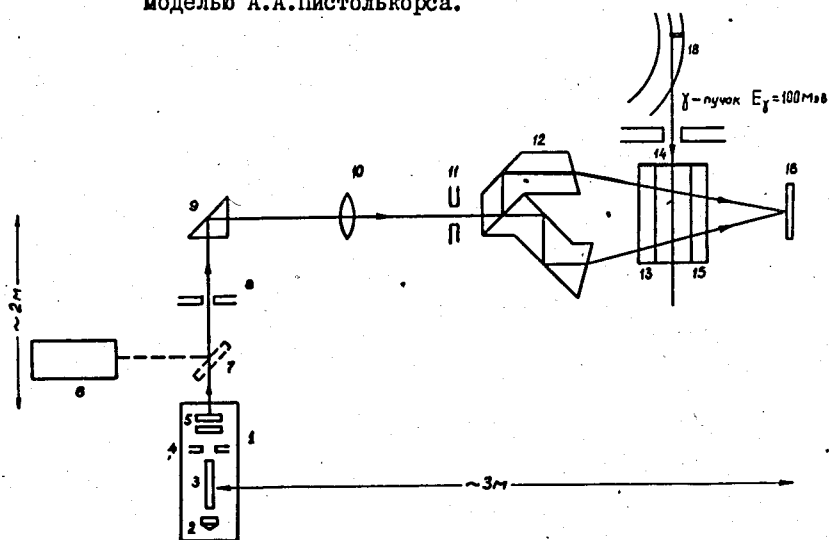


Рис. 5. Схема оптической системы голографирования малой фреоновой камеры на синхротроне: 1 - рубиновый лазер; 2, 3, 4, 5 - детали резонатора лазера; 6 - вспомогательный лазер; 7, 8, 9, 10, 11 - детали оптической телескопической системы; 12 - делитель пучка; 13, 14, 15 - пузырьковая камера; 16 - голограмма; 18 - вакуумная камера синхротрона.

меняющих своё положение в пространстве, объектов -- короткий лазерный импульс. При этом необходимо сохранить на достаточном уровне величину когерентности лазерного излучения. В диссертации даны оценки необходимой длительности лазерного импульса при регистрации треков в пузырьковых камерах.

На рис.5 приведена схема расположения голографической камеры на синхротроне ЛИЯФ. В качестве осветителя был использован импульсный лазер "Раздан 2М" с пассивным модулятором на растворе фталацианина ванадия. Длительность светового импульса в однопичковом режиме генерации - 20 нс. Длина волны излучения - 694 нм. В качестве регистрирующих фотоматериалов использовались фотопленки, фотопластинки советского производства. При работе на ускорителе голографическая камера была заполнена фреоном Ф-13. Через неё пропускался пучок γ -квантов длительностью 400 мкс с энергией 80 МэВ. Голографирование выполнялось с задержкой около 1 мс.

При голографировании следов электронов от γ -источника время задержки голографирования было переменным. При этом были использованы рубиновый лазер с электрооптической модуляцией добротности и жидкостный ЛОС-4м. Длина волны излучения ЛОС-4м - 560 нм, длительность светового импульса - 1,5 мкс.

На рис.6 приведены фотографии восстановленных с голограмм изображений треков электронов от источника ^{60}Co . Размеры элементов треков на восстановленных изображениях в зависимости от условий голографирования и режима работы камеры меняются от 20 до 200 мкм^{14/}.

Полученные результаты подтвердили практическую возможность регистрации быстротекающих процессов с применением импульсных лазеров разного типа, а также определили весь комплекс аппаратуры, необходимой для голографической регистрации треков в пузырьковых камерах с высоким разрешением.

Важным моментом исследований с применением голографических пузырьковых камер является восстановление и обмер треков заряженных частиц. Анализ метрических свойств голограмм был выполнен автором с сотрудниками в работе^{15/}. Макетные измерения восстановленных голограмм показали, что положение объекта в пространстве, восстановленное с однолучевой голограммы, может быть определено в плоскости xy (перпендикулярно лучу) с точностью ± 2 мкм, а по оси z может достигать $\pm 100 + 300$ мкм. Для повышения точности установления координаты z объекта автором предложено восстанавливать положение объекта в пространстве, используя две голограммы, полученные под разными углами^{16/}.

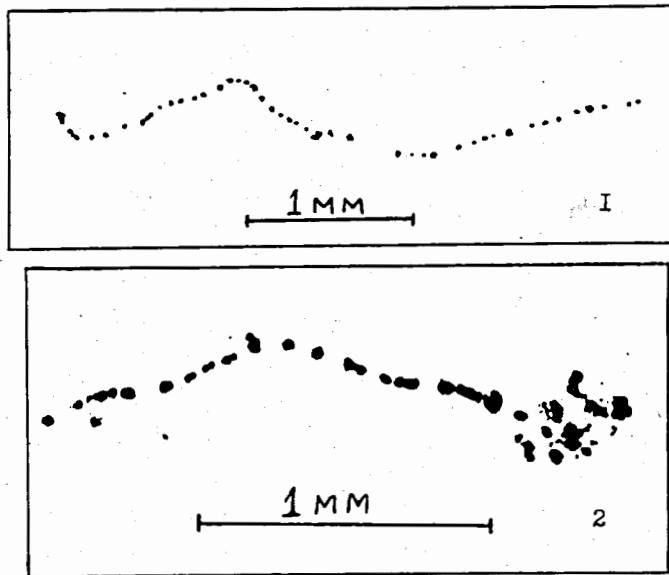


Рис. 6. Восстановленные изображения треков электронов в голографической пузырьковой камере: 1 - фотография трека электрона, восстановленного с голограммы, полученной с жидкостным лазером; 2 - то же с голограммы, полученной с рубиновым лазером. Плотность элементов треков на фотографиях - более 100 шт. на см пробега.

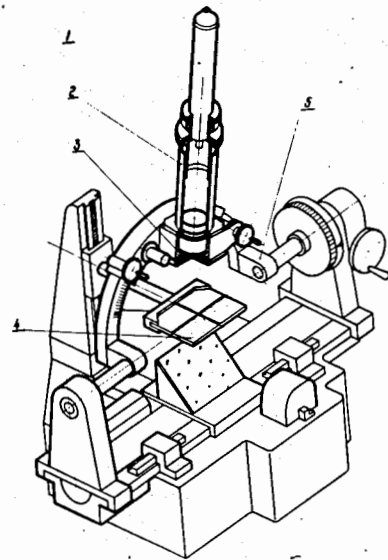


Рис. 7. Конструкция установки для восстановления и обмера голограмм: 1 - осветитель (лазер ЛГ-56); 2 - телескопическая система; 3 - голограмма; 4 - матовый экран с перекрестием; 5 - поворотный сектор с подвижной кареткой.

Для измерения восстановленных изображений треков с голограмм была разработана и создана специальная установка – голографический репроектор. Его схема приведена на рис.7. Третья глава заканчивается описанием его устройства^{17/}.

Четвёртая глава содержит результаты поисковых экспериментов, направленных на регистрацию искровых разрядов разной длительности в газах как прозрачных оптических неоднородностях (ПОН) с применением излучения лазеров и голографии.

Эта задача возникла как следствие развития исследований глубоко-неупругих взаимодействий с применением гибридной газожидкостной камеры. После изучения общих характеристик ядерных расщеплений по всем каналам были выделены определенные процессы, представляющие в данный момент наибольший интерес. Сечение этих процессов существенно меньше полного.

Для решения таких задач очень удобна стримерная камера. Она является управляемым детектором. Трекочувствительная среда в ней – газ, возможна работа при интенсивных потоках первичных частиц-снарядов до 10^8 1/с. Возможности стримерной камеры имеют границы. Так, яркость свечения треков сильно зависит от первоначальной ионизации. Ограниченная широта существующих фотоматериалов не позволяет регистрировать на одинаковом уровне качества все треки частиц в расщеплении. Следы с короткими пробегами теряются. Ограничен набор газов, пригодных для наполнения камеры. Особые трудности возникают при регистрации треков в камере, заполненной водородом.

Поиском путей для расширения экспериментальных возможностей стримерных камер долгое время занимаются многие исследователи в нашей стране и за рубежом. В диссертации дан краткий обзор основных отправных идей таких попыток и приведены результаты экспериментов.

Продолжая исследования возможностей голографического метода, автором с сотрудниками был предложен и развит новый способ регистрации треков заряженных частиц в стримерных камерах в качестве прозрачных оптических неоднородностей (ПОН).

В первом цикле экспериментов была выяснена возможность регистрации искровых разрядов микросекундной, а затем наносекундной длительности в воздухе в качестве ПОН с применением голографии^{18-20/}. Приведены описания установки, разработанной для регистрации ПОН в газовой среде, схемы управления, обеспечивающие синхронизацию искровых генераторов и импульсных лазеров в наносекундном диапазоне. Определены условия, позволяющие регистрировать искровые каналы с разными задержками относительно начала разряда. Среди иллюстраций к главе приведены фотографии искровых каналов, восстановленные с интерферограмм,

и тенеграммы, демонстрирующие возможность регистрации и восстановления ПОН разработанным методом.

В процессе экспериментального исследования тенеграмм искровых каналов было установлено, что при задержках регистрации до 30 + 50 нс просматриваются только отдельные элементы разряда. Плотность канала разряда нарастает до 400 + 500 нс. Далее от канала отрывается ударная волна и удаляется от места её образования со скоростью звука. Изображение центра канала при этом уменьшается по яркости, сохраняясь до задержек регистрации около 100 мкс.

Эти экспериментальные результаты стали основой для формального анализа основных процессов, сопровождающих лазерную регистрацию ПОН/21/.

Основные этапы проделанных расчетов следующие. Оптическая неоднородность в виде ионизованного газа характеризуется величиной рефракции ($n-1$), n - коэффициент преломления газа.

Величина рефракции плазмы, содержащей свободные электроны и тяжелые частицы (атомы, молекулы), определяется как сумма величин рефракций от частиц каждого сорта:

$$n-1 = (n_e - 1) + (n_a - 1).$$

Далее в работе на основе известных физических процессов выполнена оценка величин рефракций, связанных с концентрацией электронов ($n_e - 1$) и ионов ($n_a - 1$) в стримере.

Зависимость величины ($n_e - 1$) от концентрации электронов N_e и длины волны проходящего света λ имеет вид

$$n_e - 1 = -4,43 \cdot 10^{-14} \lambda^2 N_e^2.$$

Выполнена оценка вклада в рефракцию тяжелой компоненты. Её величина определяется плотностью газа в канале стримера, которая в основном зависит от газодинамических процессов, сопровождающих его развитие:

$$n_a - 1 = (n_0 - 1) \frac{\rho}{\rho_0},$$

где n_0, ρ_0 - коэффициент преломления и плотность газа в нормальных условиях; ρ - плотность "разогретого" газа в канале стримера.

Электроны в канале стримера передают за счёт столкновений свою энергию тяжелым частицам. Полагая, что этот процесс в стримере заканчивается установлением равновесия при некоторой температуре T , можно установить её из уравнения Саха:

$$F(T) = T - \frac{T}{K} \left[A - \ln \left(\frac{T^{3/2} N_a}{N_e} \right) \right]^{-1}.$$

Корень этой функции определяет значение равновесной темпера-

туры T ; N_a, N_e - концентрации ионов и электронов в плазме; J - потенциал ионизации; K - постоянная Больцмана; A - константа.

Характерные времена установления равновесия для легких газов - десятки наносекунд. Характерные равновесные температуры - несколько тысяч градусов.

Полагая в соответствии с моделью точечного разрыва, что газ из объема начального энерговыделения вытесняется в узкую зону, окружающую расширяющийся объем, а газ в расширенной зоне распределяется равномерно, можно определить конечную минимальную плотность газа ρ_{\min} в стримере, имеющем радиус R_B :

$$\rho_{\min} = \rho_0 \left(\frac{R_0}{R_B} \right)^2.$$

R_0 - начальный радиус стримера, определенный из условия Рётера.

Величина относительного измерения рефракции за счёт изменения плотности тяжелой составляющей

$$\delta_a = 1 - \frac{\rho_{\min}}{\rho_0}.$$

Эта величина определяет характер прохождения света через ПОН. Результаты расчетов динамических характеристик газов в стримере приведены в таблице. Данные приведены для момента $t_0 + 50$ нс, где t_0 - время завершения передачи энергии от электронов к ионам газа и $t_2 = t_B$ - время окончания расширения нагретого газа - отрыв ударной волны. Из таблицы видно, что вклад электронной составляющей в изменение величины рефракции пренебрежимо мал. Изменение рефракции в основном определяется тяжелой компонентой газа, содержащегося в стримере. Это означает, что для лазерной регистрации предпочтительнее газы с большой величиной начальной рефракции, газы при пониженной температуре и при повышенном давлении.

Полученные экспериментальные и расчетные данные позволили создать установку для регистрации треков электронов как ПОН в стримерной камере. Её схема приведена на рис.8. Оптическая система установки позволяла регистрировать треки в виде двухлучевых голограмм и тенеграмм. Стримерная камера была заполнена смесью: He - 50%, CH₄ - 50%. В качестве осветителя использовался рубиновый лазер с электрооптическим модулятором добротности. Первые голограммы и восстановленные изображения треков электронов были получены в работах^{22,23/}. Треки регистрировались по двухлучевой схеме Лейта и Упатникса с применением метода голографической интерферометрии^{24,25/}.

В диссертации приведены фотографии первых восстановленных с голограмм треков электронов. Элементы трека в стримерной камере имеют размеры 0,5 + 2 мм по длине следа при поперечном размере 0,5 + 1 мм. Протяженность элемента трека по полю существенно меньше, чем в каме-

рах, работающих в том же режиме, при фотографической регистрации.

Таблица

Динамические характеристики газов в объеме стримеров

Газ		He		H ₂		Ne		CH ₄	
E ₀ , кВ/см		20	30	30	40	20	40	40	60
R ₀ , мкм		171	110	731	546	443	166	727	215
N _e · 10 ⁻¹⁶ , см ⁻³		2,12	12,30	0,16	0,51	0,072	1,20	2,35	64,8
T _x 10 ⁻⁴ к		1,42	-1,70	0,74	0,81	-0,95	1,20	0,80	1,18
t ₁ = t ₀ + 50 нс	R ₁ , мкм	264	225	848	680	486	219	958	502
	δ _e	0,003	0,017	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,007
	δ _a	0,58	0,78	0,25	0,36	0,17	0,43	0,42	0,82
	Δn × 10 ⁴	0,21	0,28	0,37	0,52	0,11	0,29	2,04	4,0
t ₂ = t ₀	t _g - t ₀ , нс	808	250	8950	4173	17640	1090	9978	842
	R ₂ , мкм	544	368	2297	1774	1248	500	2610	895
	δ _a	0,90	0,91	0,90	0,91	0,87	0,89	0,92	0,94
	Δn × 10 ⁴	0,32	0,32	1,30	1,31	0,59	0,61	4,43	4,52

Помимо регистрации двухлучевых голограмм были зарегистрированы однолучевые голограммы - тенеграммы. Структура элементов трека на тенеграмме такова, что позволяет со сравнительно высокой точностью установить положение середины элемента трека. На этой основе показана возможность использования стереотенеграмм для определения положе -

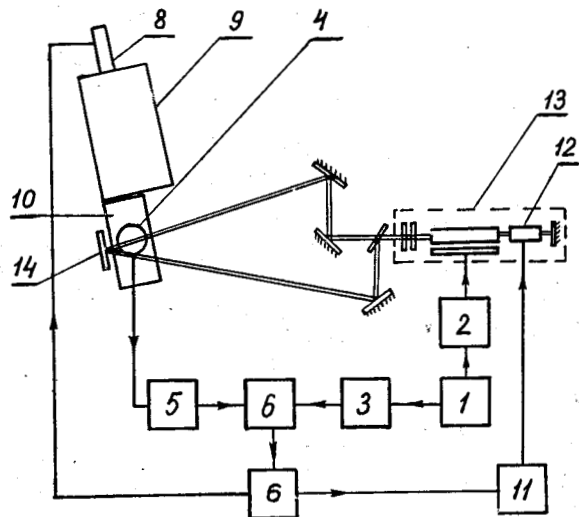


Рис. 8. Схема установки для регистрации треков электронов в стримерной камере с рубиновым лазером: 1 - генератор импульсов запуска; 2 - блок накачки лазера; 3 - стробгенератор; 4 - счетчик β -частиц; 5 - формирователь; 6 - командный блок; 8, 9 - ГИН с блоком запуска; 10 - камера; 11, 12 - оптический затвор с блоком питания; 13 - лазер на рубине; 14 - фотографическая плёнка.

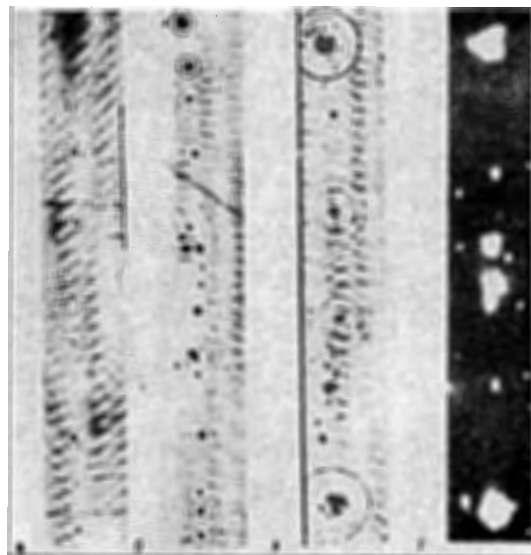


Рис. 9. Треки β -частиц длиной 3 см в смеси 70%Ne + 30%CH₄: а, б, в - тенеграммы задержки регистрации: а - 100 нс; б - 200 нс; в - 1 мкс. Фотоплёнка ФПГВ-2 ($S = 0,2$ ед.ГОСТ), лазер на рубине; г - фотоснимок: плёнка "Изопанхром" ($S = 900$ ед.ГОСТ), объектив "Гелиос-40", диафрагма 1 : 1,5.

ния следа частицы в пространстве без их голографического восстановления /26/.

На рис.9. приведены изображения треков электронов в стримерной камере, зарегистрированные с помощью лазерного излучения в виде тенеграм, а также в виде фотографии.

В диссертации описано несколько способов повышения эффективности регистрации случайных распределенных во времени событий с помощью лазерных камер. Среди них - регистрация треков с помощью излучения азотного лазера. Главные его достоинства - короткий импульс (10 нс) и быстрый запуск (~100 нс). Эти особенности позволили увеличить эффективность регистрации треков на порядок, а также существенно упростить схему управления установкой.

Для регистрации треков лазерным методом в камерах сравнительно больших размеров при подготовке к работе на ускорителе было разработано несколько вариантов оптических схем, позволяющих решить эту задачу. Одна из них приведена на рис.10. В схемах такого типа тенеграмы проецируются на полупрозрачную рассеивающую стеклянную пластину с помощью лучей света, имеющих разный цвет или разную поляризацию /27/.

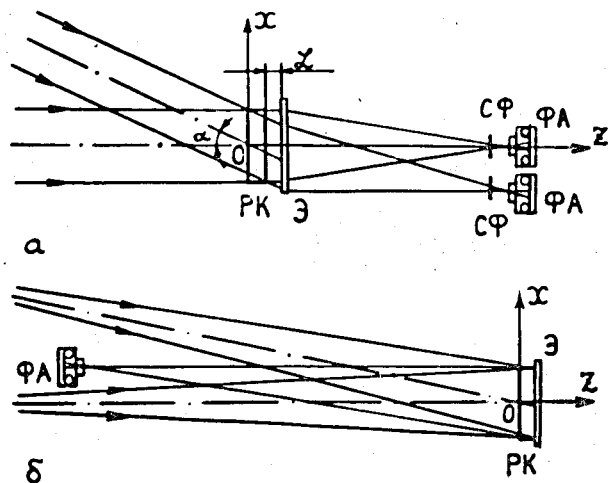


Рис. 10. Схема регистрации стереотенеграм путем фотографирования проекции треков с матового экрана: РК - разрядная камера, Э - матовый экран, ФА - фотоаппараты, СФ - светофильтры или поляризаторы.

Изображения тенеграм с экрана фотографируются с помощью фотоаппаратов с разными светофильтрами или поляридами соответствующей ориентации.

Расчетный анализ условий лазерной регистрации в стримерной камере показал, что набор газов, пригодных для наполнения камер, может быть расширен. Эта возможность была проверена экспериментально. Из результатов этой работы, изложенной в диссертации, следует отметить ту часть, в которой исследовалась возможность наполнения стримерной камеры водородом. Детектор такого типа открывает возможность для широкого класса новых исследований на чистой нуклонной мишени. В наших окончательных экспериментах была использована стеклянная камера 200x200x60 мм³, работающая в режиме самодантирования без каких-либо добавок /28,29/. Основным наполнителем - водородом, по данным хроматографического анализа, не имел примесей на уровне более 10⁻³%. Импульсное напряжение питания камеры равнялось 30 кВ/см. Треки электронов проектировались в виде тенеграм на стандартную фотопленку "Изопанхром-18" (S_{0,85} = 12 ед.ГОСТ, R = 300 лин./мм). Давление в камере менялось от 0,4 до 1,0 ат.

Были получены контрастные тенеграмы треков в чистом водороде во всем диапазоне давлений. В диссертации приведены фотографии тенеграм, полученные при разных режимах работы камеры.

Проданные исследования продемонстрировали возможность создания лазерной стримерной камеры с широкими новыми возможностями и позволили приступить к созданию на этой основе трекового многочастичного спектрометра, предназначенного для работы на синхротроне ЛИЯФ.

В пятой главе описаны условия работы на протонном пучке синхротрона ЛИЯФ новых установок - гибридной газожидкостной камеры и лазерной стримерной камеры и приведены полученные результаты.

Основной задачей экспериментов на ускорителе являлось получение первой информации о глубоко неупругих расщеплениях на чистых ядерных мишенях и выяснение возможностей новых установок в практической работе на ускорителе.

Общая схема расположения гибридной газожидкостной камеры и её протонного тракта в экспериментальном зале приведена на рис.11.

Магнитный тракт для гибридной газожидкостной камеры был рассчитан и настроен как источник "карандашного" пучка диаметром 1,5 см в связи с тем, что он должен обеспечивать минимальный фон в камере при работе с газовыми мишенями.

В диссертации описана подготовка протонного магнитного тракта, включающего магнит МС-12, к исследованиям с гибридной газожидкостной камерой и лазерной стримерной камерой с ускоренными частицами с импульсами от 600 МэВ/с до 1600 МэВ/с.

Для работы с гибридной камерой необходим нерастянутый во времени пучок (200 мкс) с $10^3 - 10^4$ частиц в одном сбросе. При этом мгновенная интенсивность близка к 10^8 1/с. Это высокая интенсивность, трудная для измерения.

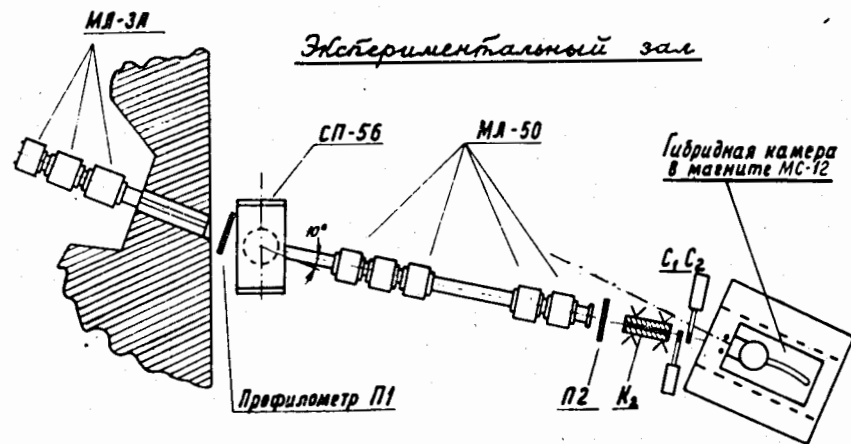


Рис. II. Схема расположения гибридной газожидкостной камеры в экспериментальном зале синхроциклотрона.

Для измерения числа протонов в разовом сбросе был разработан, создан и задействован в работе с ускорителем интегральный интенсивметр на основе сцинтилляционного счётчика^{/30/}. Величина среднеквадратичной ошибки измерения 1000 протонов в одном сбросе этим детектором не хуже 9%.

Работа гибридной камеры на пучке протонов была начата при наполнении камеры-мишени чистым газом ^{40}Ar . Рабочее давление - 2,3 ат.

Настройка на пучке гибридной камеры в экспериментальном зале выполнялась при наблюдении за режимом её работы и положением пучка в камере по телевизионному каналу с запоминающим блоком типа "Литокон".

Регистрация ядерных взаимодействий в гибридной камере выполнялась единой системой, включающей три объектива "Руссар-Плазмат" ($f = 150$ мм, $2\omega = 60^\circ$). Каждое расщепление полностью фотографировалось на одном кадре фотопленки с размерами 80×130 мм².

При определении кинематических характеристик треков частиц анализировались четыре возможные при наших энергиях версии масс частиц-продуктов с положительным зарядом (m_π^+ - масса π -мезона, m_p - масса протона, m_d - масса дейтрона, m_α - масса α -частицы) и m_π^- - с отрицательным зарядом.

Наличие двух сред с "фильтром" между ними в виде стенки камеры-мишени (4 мм, сталь) позволяло достоверно идентифицировать частицы в случае их выхода в пузырьковую камеру. В тех случаях, когда при установлении массы частицы оставалась неопределенность, выполнялся сравнительный анализ её ионизационных потерь. В диссертации описаны методика таких измерений и созданная для этой цели аппаратура.

После четырех экспозиций на протонном пучке было получено около 10000 стереофотографий. В диссертации приводятся результаты обработки и анализа 2,5 тысяч ядерных расщеплений.

При анализе 2000 стереопар было найдено 657 случаев неупругого взаимодействия протонов. Основные результаты их обработки и анализа опубликованы в работах^{/31-35/}.

В результате этой работы была получена первая подробная информация о расщеплениях ядра ^{40}Ar , в том числе: полное сечение, сечение выхода протонов, π -мезонов, α -частиц. На рис. 12, 13 приведены в качестве иллюстраций энергетическое распределение π -мезонов и корреляционные зависимости выхода π -мезонов и α -частиц от множественности в расщеплении.

Следует отметить, что использование газовой мишени позволило исследовать характер мягкой части π -мезонного спектра. Корреляционные зависимости получены впервые и в настоящее время обсуждаются.

Полученные результаты проанализированы в рамках модифицированного внутриядерного каскада (МВК). Результаты расчётов приведены на графике и в таблицах. Угловые и энергетические спектры неплохо описываются этой моделью. Заметные расхождения экспериментальных данных и расчетов наблюдаются для выхода π -мезонов, отношения π^+/π^- . В диссертации обсуждаются возможные причины этих расхождений.

После окончания исследований возможностей лазерных стримерных камер с β -источниками была создана основа для перехода к экспериментам с новыми установками на синхроциклотроне ЛИЯФ.

Задачей этих экспериментов было исследование возможностей новых установок при изучении глубоконеупругих взаимодействий. Описана вновь созданная установка - лазерная стримерная камера (ЛСК), предназначенная для работы с СЦ. Она включает сам прибор ЛСК, лазерную систему освещения, фоторегистрирующие узлы, генераторы импульсных напряжений, триггерную систему на сцинтилляционных счётчиках. Управление триггерной системой, разработанной в системе КАМАК, выполняется малой ЭВМ СМ-4. Содержание этой части диссертации описано в работах^{/36, 37/}.

Было выполнено два цикла экспериментов.

В первом ЛСК работала без магнитного поля. Регистрация треков выполнялась путём прямого проектирования треков на фотопленку с по-

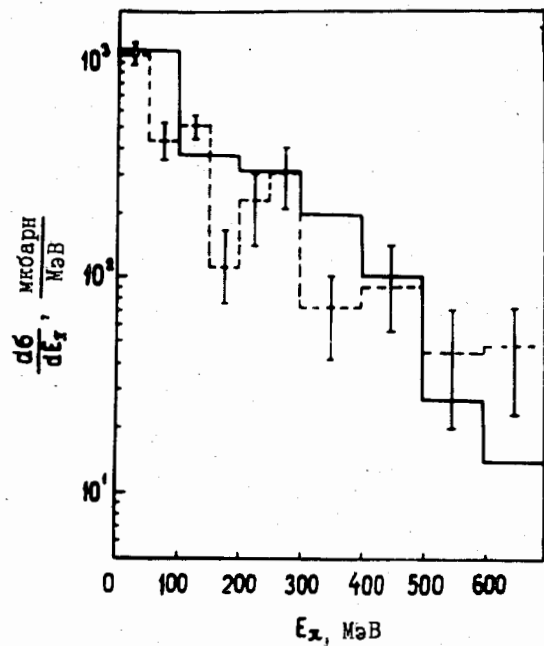


Рис. 12. Энергетический спектр π -мезонов.

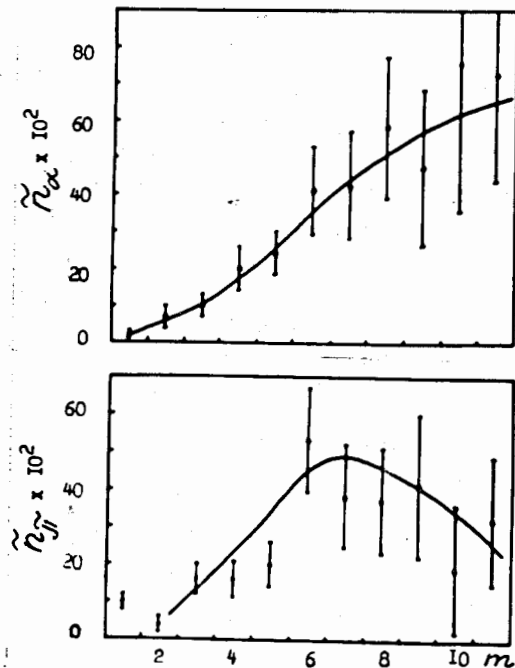


Рис. 13. Зависимость относительного выхода α -частиц и π^\pm -мезонов от множественности m .

мощью азотного лазера. Размер кадра 12×8 см². ЛСК с размером $25 \times 25 \times 6$ см³ была заполнена смесью: 70% He и 30% CH₄. Давление равно атмосферному. Одновременно с лазерной регистрацией выполнялась фотографическая запись ядерных взаимодействий. Анализ полученных тенеграмм позволил установить следующее.

В ЛСК можно регистрировать с достаточной четкостью как отдельные треки частиц, так и многолучевые расщепления, состоящие из частиц разных энергий. Сопоставление основных характеристик треков разных частиц при разных условиях регистрации показало, что по таким параметрам, как размеры элементов треков вдоль и поперек электрического поля, плотности ионизации, возможности установления середины трека, лазерные тенеграммы в лучшую сторону отличаются от фотографий, полученных в тех же условиях.

Во втором цикле работ ЛСК была размещена в магнитном поле МС-12. Она является вершинным детектором магнитного многочастичного детектора, предназначенного для изучения распада высоковозбужденных атомных ядер^{/38/}.

Регистрация вершин взаимодействий выполнялась новым способом, защищенным авторским свидетельством^{/27/}. Схема регистрирующей системы, расположенной в МС-12, приведена на рис.14. Фотографирование треков выполнялось на стандартную фотопленку "Изопанхром 21" шириной 35 мм, $S_{0,85} = 120$ ед.ГОСТ, и разрешением 280 л/мм. Камера была наполнена 50% H₂ и 50% CH₄ при атмосферном давлении. Для освещения объема ЛСК использовался лазер ЛОС-4м. В диссертации дано подробное описание установки и полученных результатов. На рис.15 приведены стереотенеграммы расщепления ядра углерода. Четко видны вершина расщепления и треки вторичных частиц с разной плотностью ионизации.

Полученные результаты позволяют считать, что испытания комплекса ЛСК с ускорителем прошли успешно и установка может использоваться для проведения ядерных исследований.

В приложении описана новая установка, предназначенная для регистрации профилей потоков ядерных излучений. Идея создания такого прибора высказана Аскарьяном Г.А. и др.^{*} Созданный прибор представляет собой пузырьковую камеру с чувствительным слоем, изготовленным в виде диска с диаметром 200 мм и толщиной 2-3 мм. Прибор был испытан как профилометр на синхротриклотроне ЛИЯФ и как регистратор потока проходящих частиц в составе дефектоскопической установки в производственных условиях^{/39,40/}.

^{*} Г.А.Аскарьян и др. ЖЭТФ, 1959, т.37, с.1469.

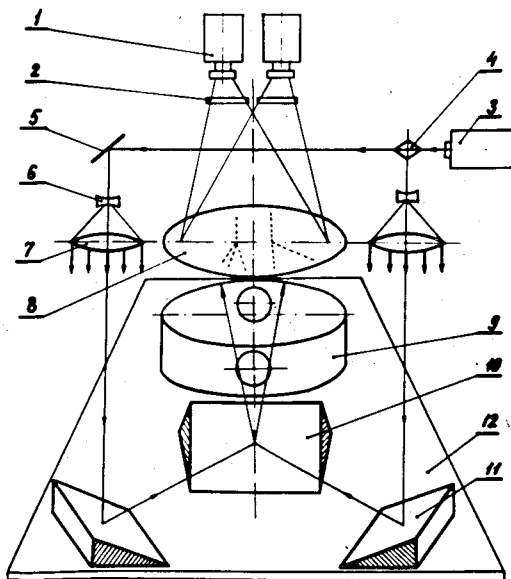


Рис. 14. Схема регистрации лазерных стереотеннеграмм: I - регистрирующие фотокамеры РЭК-5; 2 - поляризационные светофильтры; 3 - жидкостный лазер с ламповой накачкой; 4 - поляризационная призма-разветвитель пучка света; 5, 10, 11 - зеркала; 6, 7 - телескопическая система; 8 - матовый экран; 9 - стримерная камера; 12 - монтажная платформа.

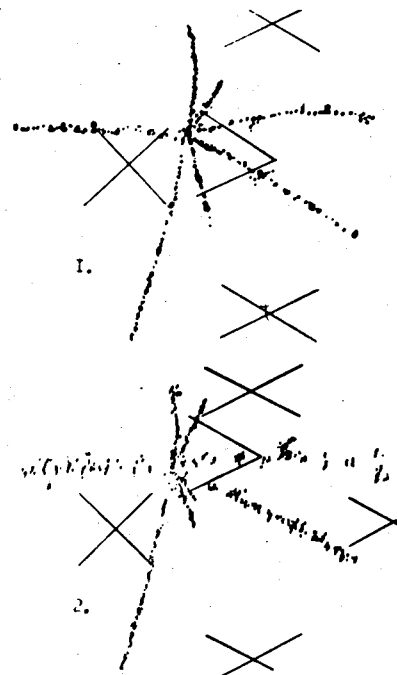


Рис. 15. Стереотеннеграммы расщепления ядра углерода протоном (1 ГэВ), зарегистрированные в магнитном поле МС-12: I - проекция в направлении электрического поля в камере; 2 - проекция под углом 15° .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

А. Предложен и реализован новый принцип построения детекторов ядерных реакций, предназначенных для изучения глубокоэластичных взаимодействий с чистыми ядерными мишенями. Он заключается в функциональном объединении двух детекторов, по своим возможностям дополняющих друг друга, что обеспечивает регистрацию всех заряженных продуктов каждого расщепления в широком угловом и энергетическом диапазонах.

Б. Предложен и реализован новый принцип детектирования треков в следовых регистраторах в качестве динамических прозрачных оптических неоднородностей с применением импульсного излучения лазеров и голографии.

В. Предложена, обоснована и реализована возможность получения информации о ядерных взаимодействиях с высоким разрешением в больших объемах, чем это может обеспечить фотография, с помощью трековых детекторов и, в частности, с помощью пузырьковой камеры, работающей в специальном режиме с регистрацией треков методом голографии.

При реализации этих предложений выполнено следующее:

1. Создан базовый детектор, предназначенный для работы с трекочувствительными мишенями, — 130-литровая тяжеложидкостная пузырьковая камера в магнитном поле соленоида МС-12 и комплекс аппаратуры, обеспечивающий её работу с ускорителем и обработку полученной информации.

2. Созданы трекочувствительные мишени — "вершинные детекторы":

а) камера Вильсона специальной конструкции, предназначенная для работы в объеме пузырьковой камеры под наружным давлением около 30 ат;

б) фреоновая пузырьковая камера с объемом около 1 л. Камера оснащена системой, созданной для регистрации треков с помощью голографии. Практической работой с ускорителем доказана работоспособность установки. Достигнута плотность элементов трека, близкая к 100 шт./см.

3. Создана и запущена в работу с ускорителем гибридная газожидкостная камера. Её основа — базовый детектор, тяжеложидкостная 130-литровая камера, в рабочем объеме которой размещен и функционирует вершинный детектор — камера Вильсона.

4. Создана лазерная стримерная камера с регистрацией треков в виде тенеграм. Установка испытана в работе на синхротроне ЛИЯФ. Показано, что лазерная стримерная камера позволяет эффективно увеличить яркость изображений малосветящихся релятивистских треков на несколько порядков, расширить диапазон регистрируемых одновременно треков с разной величиной удельной ионизации, повысить точность регист-

рации координат треков частиц и их ионизационных характеристик. Доказана работоспособность лазерных стримерных камер при использовании широкого набора рабочих газов.

5. Разработана теоретическая модель для описания механизма регистрации треков в лазерных стримерных камерах. На этой основе создана первая лазерная стримерная камера, работающая при неэкстремальных режимах с наполнением чистым водородом в широком диапазоне рабочих давлений.

6. Предложен, разработан и реализован в работе на ускорителе новый способ регистрации пространственного расположения треков в камерах по фотографиям их лазерных стереотенеграмм. Это решение открыло возможность работы с трековыми лазерными детекторами с использованием для обработки информации существующей техники обмера и машинного анализа следовой информации.

7. Получена первая экспериментальная информация о глубоконеупругих взаимодействиях протонов (1 ГэВ) с ядрами изотопно чистой мишени ^{40}Ar с регистрацией в гибридной газожидкостной камере продуктов взаимодействия в широком угловом и энергетическом диапазонах. Экспериментальные данные проанализированы с привлечением современных моделей адрон-ядерных взаимодействий.

8. Предложена конструкция и создана новая установка для измерения профилей пучков частиц и дефектоскопии – листовая пузырьковая камера. Она испытана в работе с ускорителем в ЛИЯФ и на дефектоскопическом стенде.

АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ

Работы, составляющие основу диссертации, докладывались автором на семинарах по камерной методике ОИЯИ и ЦЕРНа в Дубне в 1965 году и в Алуште в 1968 году, на рабочем совещании по технике пузырьковых камер в Дубне в 1969 году и на Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий в 1970 году; материалы были представлены на международную конференцию по аппаратуре в физике высоких энергий, 1973 год (Италия, Фраскати).

Эти работы в виде обзорного доклада автора опубликованы в материалах Международного симпозиума по вопросам автоматизации обработки данных с пузырьковых и искровых камер, 1971 год (Дубна), а также докладывались и опубликованы в материалах Первой, Третьей и Четвертой Всесоюзных конференций по голографии в Тбилиси, Ульяновске и Ереване.

Представленные в диссертации результаты изложены в 40 публика-

циях в ведущих советских и зарубежных физических журналах, в том числе ЖЭТФ, ЖТФ, ПТЭ, ДАН СССР, "Nuclear Instr. and Methods", "Nuclear Phys.", в препринтах ЛИЯФ, сообщениях ОИЯИ, трех авторских свидетельствах.

Установки – гибридная газожидкостная камера и лазерная стримерная камера – в 1979 и 1982 г. экспонировались в павильоне "Физика АН СССР" на ВДНХ СССР и удостоены серебряных медалей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стабников М.В. Материалы рабочего совещания по технике пузырьковых камер. Дубна, 1969, ОИЯИ, I3-4466, с.177.
2. Стабников М.В. и др. Материалы семинара по камерной методике ОИЯИ и ЦЕРНа. Дубна, ОИЯИ, 1965, с.2.
3. А.с.№ 602011 (СССР) Пузырьковая камера. Баканов Л.В., Ермаков К.Н., Лебедев В.Д., Стабников М.В. Бюл.ОИШОТЭ, 1979, № 14, с.291.
4. Стабников М.В. и др. Л., 1976, Препринт ЛИЯФ, № 251.
5. Стабников М.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1976, т.24, в.5, с.320.
6. Stabnikov M.V. И И М, 1977, в. 144, р. 99.
7. Комар А.П., Стабников М.В., Турухано Б.Г. Материалы семинара по камерной методике ОИЯИ и ЦЕРНа. Дубна, ОИЯИ, 1965, с.7.
8. Комар А.П., Стабников М.В., Турухано Б.Г. ДАН СССР, 1966, т.169, с.1966.
9. Комар А.П., Стабников М.В., Турухано Б.Г. ДАН СССР, 1967, т.174, с.1052.
10. Стабников М.В., Турухано Б.Г., Найденов А.Ф. ЖТФ, т.37, 1967, № 5, с.986.
11. Стабников М.В. Л., 1968, Препринт ФТИ им.А.Ф.Иоффе, № 148.
12. Стабников М.В. Дубна, 1971, ОИЯИ, Д 10,6-142, с.448.
13. Комар А.П., Стабников М.В., Турухано Б.Г. Л., 1968, Препринт ФТИ им.А.Ф.Иоффе, № 79.
14. Стабников М.В. и др. Л., 1983, Препринт ЛИЯФ, № 829.
15. Найденов А.Ф., Стабников М.В. Материалы совещания по оптической голографии. Л., 1972. Издание дома НТП, с.84.
16. Найденов А.Ф., Стабников М.В. Тбилиси, 1972, материалы I Всесоюзной конференции по голографии, вып.3.
17. Стабников М.В. и др. Материалы рабочего совещания по технике пузырьковых камер. Дубна, 1969, ОИЯИ, I3-4466, с.34.
18. Стабников М.В., Томбак М.А. Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий. Дубна, 1970, Д-5805, Дубна, 1970, с.382.
19. Стабников М.В., Томбак М.А. ЖЭТФ, 1971, т.16, в.6, с.1310.
20. Стабников М.В., Томбак М.А. ЖТФ, 1972, т.17, вып.5, с.1013.

21. Стабников М.В., Томбак М.А. Л., 1979, Препринт ЛИЯФ, № 497.
22. Стабников М.В., Томбак М.А. Тбилиси, 1972, Материалы I Всесоюзной конференции по голографии, вып.3, с.55.
23. Стабников М.В. и др. Л., 1973, Препринт ЛИЯФ, № 36.
24. Stabnikov M.V. et al. Intern. Conf. of Instrumentation in High Energy Phys. Italy, Frascaty, 1973, p. 7.
25. Stabnikov M.V. et al. N I M, 1977, v. 14, p. 125.
26. Стабников М.В. и др. Л., 1976, Препринт ЛИЯФ, № 262.
27. А.с. № 717682 (СССР). Способ освещения и фотографирования следов заряженных частиц в трековых камерах. М.В.Стабников, М.А.Томбак. ОИПОТЗ, 1980, №7, с.260.
28. Стабников М.В. и др. Л., 1979, Препринт ЛИЯФ, № 518.
29. Stabnikov M.V. et al. N I M, 1981, v. 185, p. 81.
30. Лобанов О.В., Стабников М.В. Л., 1982, Препринт ЛИЯФ, № 822.
31. Стабников М.В. и др. Л., 1978, Препринт ЛИЯФ, № 440.
32. Стабников М.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1977, т.25, с.337.
33. Стабников М.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.29, с.797.
34. Stabnikov M.V. et al. J. Phys.G: Nucl.Phys., 1983, v. 9, p. 143.
35. Стабников М.В. и др. Известия АН СССР (сер.физ.), 1978, т.42, с.1906.
36. Стабников М.В. и др. Л., 1978, Препринт ЛИЯФ, № 407.
37. Стабников М.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т.30, с.460.
38. Стабников М.В. и др. Л., 1981, Препринт ЛИЯФ, № 709.
39. А.с. № 741213 (СССР). Пузырьковая камера. М.В.Стабников. Бюл.ОИПОТЗ, 1980, №22, с.248.
40. Стабников М.В. и др. Л., 1979, Препринт ЛИЯФ, № 495.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 июня 1983 года.