

М-353



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-93-343

На правах рукописи

УДК 539.1.27

МАТЮШИН
Александр Тарасович

**ИССЛЕДОВАНИЕ, СОЗДАНИЕ
И ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ
С ИСКРОВЫМИ И СТРИМЕРНЫМИ КАМЕРАМИ
В ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Дубна 1993

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий и в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор	Борис Борисович Говорков
доктор физико-математических наук, профессор	Алексей Федорович Писарев
доктор физико-математических наук, профессор	Михаил Иосифович Соловьев

Ведущая организация:

Физический институт академии наук, г. Москва.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1993 г. в ___ час. на заседании Специализированного совета Д-047.01.02. при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, конференц - зал ЛВЭ, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ

Автореферат разослан "___" _____ 1993 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук.

М. Ф. Лихачев

М. Ф. Лихачев.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. В экспериментах по физике высоких энергий на ускорителях частиц исследуемые процессы отличаются, как правило, сравнительно малыми сечениями. Специфические характеристики этих процессов вынуждают вести отбор редких событий на весьма интенсивном фоне сопутствующих взаимодействий. В таких исследованиях исключительно важно иметь управляемый детектор частиц, позволяющий получать хорошее временное разделение и пространственную локализацию событий. По этой причине разработка и создание новых детекторов, регистрирующих взаимодействия частиц высоких энергий, является важным и актуальным направлением развития современной экспериментальной физики. Как показала практика, особая роль здесь принадлежит трековым детекторам, с успехами в развитии которых связаны фундаментальные открытия в физике элементарных частиц. Трековые детекторы позволяют регистрировать заряженные частицы индивидуально и непосредственно по их следам, что обеспечивает наглядность и строгую документальность информации о редких процессах.

В последние десятилетия классическое семейство трековых детекторов, таких как камеры Вильсона, диффузионные и пузырьковые камеры - пополнилось искровыми и стримерными камерами. Разработка методических проблем этих детекторов, особенно стримерных, создание экспериментальных установок с искровыми и стримерными камерами, а так же использование их в физических исследованиях на ускорителях, составляет основу защищаемой диссертации. Разработка и создание установок с быстрыми трековыми детекторами продолжает оставаться актуальной задачей в связи с ростом требований предъявляемых к надежности и точности экспериментальных исследований, планируемых на новом ускорителе ЛВЭ ОИЯИ - нуклотроне. Не исключено, что многообразие проблем исследований на ускорителях следующего поколения придаст новый импульс использованию детекторов этого типа.

Физический институт
ОИЯИ

ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ РАБОТЫ. Основными целями работы являлись разработка, создание и использование комплексов искровых и стримерных камер в крупных установках для исследований по физике частиц высоких энергий на синхрофазатроне ЛВЭ ОИЯИ.

Разработки и использование искровых камер в физических экспериментах на синхрофазатроне автором с сотрудниками были начаты в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в 1961 г. Для исследования упругого π^+ рассеяния на большие углы и поисков радиационных распадов резонансов в первую очередь, оказались необходимыми искровые камеры имеющие рабочие зазоры от 1 до 15 см.

Наряду с созданием самих камер, с изучением процессов развития искры по треку частицы, необходимо было разработать системы их импульсного питания в диапазоне 5-200 кВ, т.е. по существу создать методическую базу искровых камер для экспериментов на синхрофазатроне, которая позволяла бы осуществлять непрерывный поиск путей развития камер, обеспечивать их бесперебойную круглосуточную работу в комплексах установок на пучках ускорителя.

Если при изучении упругого рассеяния π^+ -мезонов оказалось возможным использовать обычные искровые камеры, а для регистрации распадов векторных мезонов широкозазорные, регистрирующие продукты конверсии γ -квантов в сравнительно узком телесном угле, то процессы взаимодействий релятивистских ядер с ядрами, сопровождаемые рождением многих частиц потребовали регистрации событий в 4π -геометрии. В последнем случае наиболее адекватным физике процессов детектором явилась стримерная камера.

Исследования в области стримерных камер автором с сотрудниками были начаты в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ одновременно с появлением первых сообщений о них (1964г.). Они должны были вестись в направлениях изучения условий формирования следа, поиска оптимальных конструкций системы электродов камеры, разработки генераторов высоковольтных наносекундных импульсов мегавольтного диапазона. Это было

необходимо для создания в дальнейшем крупных установок с большими стримерными камерами, действующими на ускорителе. "Большой" мы условно называем камеру, имеющую рабочий объем вблизи кубометра и более, с системой электродов, представляющей собой участок электрически согласованной полосковой линии, на которую поступают высоковольтные импульсы питания с амплитудами около 0.5 МВ и более.

Регистрация ранних стадий развития разряда по следу частицы предъявляет к стримерной камере наиболее жесткие требования сравнительно с требованиями для других трековых газоразрядных детекторов. Так, если характеристики эффективности искровых камер имеют явно выраженное и достаточно протяженное "плато" относительно величины приложенного поля, то подобного плато по световыходу следа в стримерной камере не существует. Процесс развития разряда должен быть остановлен по достижении стримерами яркости, достаточной для регистрации следа. Необходимо было провести изучение структуры стримерного следа, так как к началу наших исследований лавинно-стримерный механизм и критерии пробоя газовых промежутков Мика, Ретера, Леба, позволяли практически провести только оценки напряженности поля, необходимой для работы камеры.

Отсюда ясно, что создание большой стримерной камеры и ее использование на ускорителе - комплекс проблем, включающий исследования структуры следа заряженной частицы и механизма его формирования, разработку и создание аппаратуры "жизнеобеспечения" - генераторов импульсных электрических полей наносекундных длительностей в мегавольтном диапазоне напряжений, газовых систем с чистыми инертными газами, устройств для контроля рабочих процессов в камере и автоматизации ее управления. Необходимо учитывать радиационные условия, в которых используется камера и специфику проводимых экспериментов на современном ускорителе, а также характеристики самого ускорителя.

В связи с этим в диссертационной работе были поставле-

ны следующие задачи:

1. Исследование свойств узко- и широкозачорных искровых камер, а так же структуры следа частицы в стримерной камере.
2. Разработка и создание искровых камер и аппаратуры высоковольтного импульсного питания этих камер. Применение в установках для экспериментов на пучках синхрофазатрона.
3. Исследование стримерного режима в контролируемых условиях на модели большой стримерной камеры и выбор оптимальных условий ее функционирования.
4. Разработки методов и устройств генерирования импульсного электрического поля для искровых и стримерных камер, аппаратуры контроля, управления и наполнения газом камеры.
5. Создание большой стримерной камеры, исследование ее характеристик в лабораторных условиях.
6. Создание установки с большой стримерной камерой в магнитном поле и проведение исследований с ней на ускорителе.
7. Анализ и обобщение полученного опыта изучения свойств камеры с целью дальнейшего развития методики и экспериментальной базы для исследований на ускорителях в области релятивистской ядерной физики и других актуальных областях физики элементарных частиц.

Решению этих задач и посвящена диссертация. Основной акцент сделан на создании и применении больших стримерных камер. В этой методике, на наш взгляд, наиболее остро концентрируются основные проблемы осуществления газоразрядных трековых детекторов, т.е. экстремальные значения импульсных электрических полей наносекундной длительности, критичность параметров электрического и газового режимов работы камеры, а также ограниченность световых выходов из стримерных следов, едва достигающего порога фоторегистрации. Все эти проблемы становятся особенно важными при длительной непрерывной работе установки в радиационных условиях на пучках частиц ускорителя.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.

Созданы двухплечевая установка с черенковскими γ -спектрометрами и широкозачорными искровыми камерами для поисков радиационных распадов резонансов, искровые узкозачорные камеры для исследования упругого π^+ рассеяния на большие углы, двухметровая стримерная камера - основа магнитного спектрометра СКМ-200 для исследований многочастичных взаимодействий релятивистских ядер.

Впервые предложены и разработаны многослойные искровые камеры с двойными проволочными электродами и многослойные камеры с последовательным питанием промежутков.

Впервые предложена и осуществлена симметричная система внутренних (в контакте с рабочим газом) проволочных электродов стримерной камеры. Предложена и осуществлена первая в Европе большая стримерная камера, действовавшая на ускорителе.

Получены новые экспериментальные данные о механизме образования стримерного следа и предложена их теоретическая интерпретация.

Впервые предложена и разработана модель нарастания излучения и размеров лавины в стримерной камере, базирующаяся на учете энергии, накапливаемой лавиной к моменту достижения порога регистрации. Модель позволяет прогнозировать характеристики стримерного следа при широком изменении условий работы камеры - давления газа, длительности и амплитуды импульса поля, коэффициентов светоусиления.

Впервые обнаружена однозначная связь распределений размеров и излучения стримеров на следе частицы со спектром ее локальных ионизационных потерь в газе камеры.

Предложен и разработан метод эквивалентного прямоугольного импульса для описания развития разряда на следе частицы под действием высоковольтных импульсов произвольной формы.

Результаты исследований: в большой полноте изучен механизм образования стримерного следа, развиты методы и

устройства формирования импульсных электрических полей на наносекундных длительностях вплоть до мегавольтного диапазона рабочих напряжений, разработаны методы и устройства контроля электрических и газовых величин, характеризующих рабочий режим камер. Выполненный широкий цикл исследований позволил научно-обоснованно вести разработку и создание камер, успешно внедрять их в арсенал регистрирующей аппаратуры на ускорителе, получать экспериментальный материал, накапливать и обобщать опыт применения. В диссертации рассмотрены пути дальнейшего развития камер с целью улучшения локализации треков и расширения возможностей проведения ионизационных измерений.

Разработанные методы легли в основу создания аппаратуры высоковольтного импульсного питания больших трековых камер для установки Адрон-44 ИФВЭ АН Каз. ССР. Трех- и четырехэлектродные камеры с внутренними проволочными электродами, аналогичные нашим, впоследствии нашли применение в Дармштадте, ЦЕРНе, Серпухове.

С помощью установки, включающей широкоазорные искровые камеры, обнаружен распад фи-ноль мезона на e^+e^- пару, признанный открытием. С помощью магнитного спектрометра СКМ-200, основой которого являлась двухметровая стримерная камера на пучках синхрофазотрона, получено 300 тысяч стереофотографий взаимодействий релятивистских ядер (от гелия до кислорода с энергией 3.6 ГэВ на нуклон) с ядрами мишеней (литий, алюминий, медь, цирконий, свинец и др.) Результаты обработки и анализа этих снимков отражены в нескольких десятках научных публикаций.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ. Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на "Симпозиуме по ядерной электронике ОИЯИ", Россендорф, 1965 г., Международной конференции по физике высоких энергий 1966 г., Спрингфилд, США; на Симпозиуме по наносекундной ядерной электронике 1967 г., Дубна; Совещании по бесфильмовым искровым и стримерным ка-

мерам 1969 г., Дубна; на Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, Фраскати, Италия, 1973 г.; Всесоюзном совещании по автоматизации научных исследований в ядерной физике, 2-е, Алма-Ата, 1978 г.; II Всесоюзной школе по неупругим взаимодействиям адронов при высоких энергиях, Алма-Ата, 1982 г.; Физике на УНК, Серпухов, 1990 г. Работы докладывались также на заседаниях отделения ядерной физики АН СССР.

По результатам работ опубликовано 44 статьи, получено 12 авторских свидетельств на изобретения, зарегистрировано открытие на физическое явление.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация включает "Введение", шесть самостоятельных глав и "Основные результаты диссертации". Каждая из глав, в свою очередь, включает введение, заключение и список литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во "ВВЕДЕНИИ" сформулированы проблемы, решению которых посвящена диссертация. Эти проблемы потребовали проведения следующего цикла исследований: изучения процесса локализации газового разряда на следах заряженных частиц, изучения свойств искровых и стримерных камер, разработки и создания методико-технической базы камер, а также реализации на ее основе установок для проведения экспериментов в области физики высоких энергий на синхрофазотроне ОИЯИ. Здесь же дан краткий ретроспективный обзор работ периода становления и бурного развития методик этих камер.

ГЛАВА I включает описание механизма работы и характеристик искровых и стримерных камер, работающих при атмосферном давлении наполняющего газа - неона.

Анализ процесса развития лавины, проведенный нами с учетом электростатического расталкивания электронов в ее головке показал, что при переходе лавины в стример начинают выполняться условия, при которых дебаевский радиус экрани-

рования становится много меньше размеров лавины, что позволяет рассматривать достаточно развитую лавину, как плазменное образование. При этом стало возможным получить необходимые для практики количественные результаты относительно значений стабильности параметров импульсного электрического поля, а так же согласовать наблюдаемые и расчетные размеры стримеров^{27/}.

В §§ 1.4-1.5 приведены схемы функционирования искровых и стримерных камер, дан анализ эффективностей регистрации частиц известных и разработанных нами узкоазорных искровых камер для экспериментов по изучению упругого π^+ рассеяния^{3-5/}. Представлено краткое описание созданной с нашим участием установки с широкоазорными искровыми камерами для поиска радиационных распадов резонансов, позволившей обнаружить распад фи-ноль мезона на e^+e^- пару^{6-9/} - рис.1.

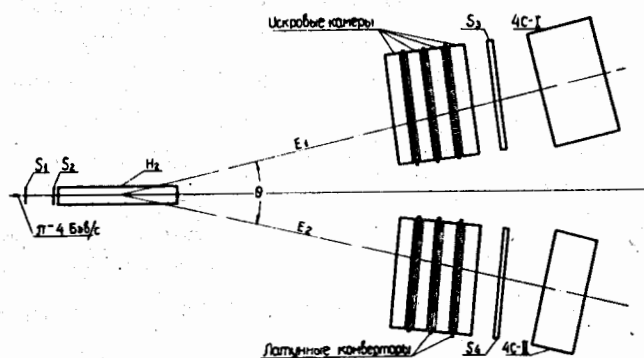


Рис.1. Схема установки для исследования радиационных распадов резонансов (S₁-S₄ -сцинтилляционные счетчики, 4C-I, 4C-II - блоки черенковских спектрометров полного поглощения, H₂ - жидководородная мишень).

На основе проведенных расчетов и экспериментов предложены двойные проволочные электроды для искровых и стримерных камер, а также последовательное питание промежутков искровых камер.^{10-12/} Проволочная "конструкция" позволяет улучшить характеристики многослойных и широкоазорных камер. Последовательное питание промежутков многослойных искровых камер приближает их по своим свойствам к широкоазорным камерам, но с временем памяти, регулируемым электрическим полем. Предложенная и осуществленная нами впервые в 1964 - 65г.г. трехэлектродная экранированная стримерная камера с проволочными электродами, расположенными внутри рабочего объема позволила исключить образование короны на проволоках электрода путем выбора диаметра и шага проволок. В такой камере удалось сохранить максимальную прозрачность электродов, а также избежать образования фигур Лихтенберга. Выполнение камеры трехэлектродной с экранированием высоковольтного электрода позволило, вместе с тем снизить электромагнитное излучение до приемлемого уровня^{13/}.

Все расчеты характеристик стримеров обычно базируются на предположении о том, что импульсное электрическое поле униполярно, а высоковольтный импульс имеет строго прямоугольную форму. На практике форма импульса далеко не прямоугольная, а импульс обычно не является униполярным. Для учета неидеальности импульса нами предложен и развит метод (§ 1.6), так называемого, эквивалентного прямоугольного импульса для описания развития стримерного разряда под действием импульса произвольной формы. Это позволило провести сравнение различных систем формирования импульсного поля для камер и поиск оптимальных вариантов таких систем^{1,2,14,15/}. В заключении сформулированы основные результаты главы.

В ГЛАВЕ II дан анализ основных факторов, определяющих разрешающую способность камеры и магнитного спектрометра на ее основе при широком изменении условий работы камеры - давления газа, напряженности и длительности электрического поля, а также величин коэффициентов усиления светорегистри-

рующих устройств. Приведены полученные нами результаты изучения структуры следа частицы в стримерных камерах.

В § 2.2 на основании литературных и полученных на нашей установке с двухметровой стримерной камерой в магнитном поле (СКМ-200) данных подтверждено, что разрешение магнитного стримерного спектрометра по импульсу заряженной частицы определяется, в основном, "зернистостью" ("шумом") фотопленки и масштабом фотографирования. Благодаря меньшему вкладу кулоновского рассеяния спектрометр со стримерной камерой способен обеспечить лучшее разрешение по импульсу частицы, чем водородная камера (рис. 2)^{16/}

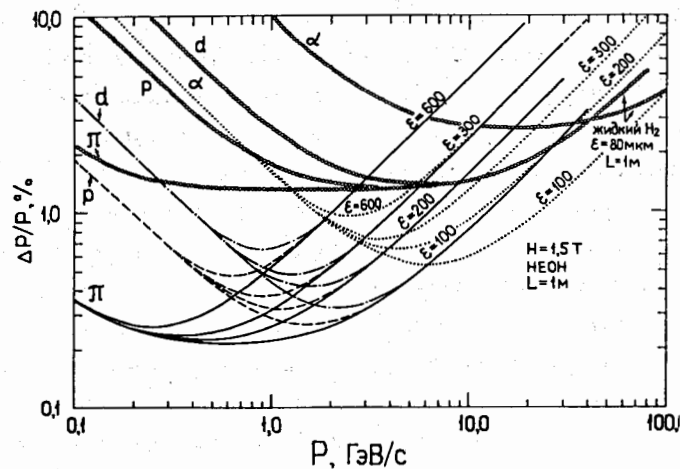


Рис. 2. Расчетные точности измерений импульсов в стримерной и жидководородной камерах, помещенных в магнитное поле напряженностью 1,5 Тл для следов длиной $L=1$ м при различных значениях погрешностей ϵ восстановления треков в стримерной камере.

Современные тенденции развития детекторов частиц в физике высоких энергий направлены на создание приборов для

регистрации частиц со временем жизни $10^{-12} - 10^{-13}$, что требует пространственного разрешения < 10 мкм. Нами были выполнены специальные исследования зависимостей размеров стримеров от условий работы камеры. На основании наших экспериментов и анализа результатов, известных из литературы, предложена модель развития лавины с учетом накопленной ею энергией^{17-19/}. Показано, (§§ 2.2-2.5) что в рамках сделанных предположений относительно пропорциональности светового излучения электростатической энергии зарядов в головке лавины, поверхностная плотность излучения $\sigma \cong k_0 \alpha EN$ [фотон/см²]. Здесь α - первый коэффициент ионизации Таунд-сенда [см⁻¹], E - напряженность поля [Всм⁻¹], N - число частиц в лавине, величина k_0 для неона по порядку величины $\sim 10^{-3}$ фотон/В.

§ 2.6 посвящен сравнению расчетных и экспериментальных данных. Здесь обращается внимание на важность учета разрешающей способности светорегистрирующих устройств. Показано, что "эффективный" коэффициент светоусиления регистрирующих устройств фактически снижается на порядок и более относительно номинального, определяемого как отношение яркости изображения (кд/м²) к освещенности фотокатода (лк). Учет разрешения позволил в рамках модели согласовать расчетные и экспериментальные данные в широком диапазоне изменений условий работы камеры - более порядка по напряженности, длительности импульса поля и давлению газа, а также несколько порядков по коэффициенту светоусиления. Показано, что разрешение камеры практически ограничивается только разрешающей способностью светоусилительной техники.

В рамках развитой нами модели находит более адекватное эксперименту объяснение наблюдаемая структура следа. Из полученных нами распределений стримеров по их диаметрам на следах однозарядных релятивистских частиц в камерах (рис. 3), а также из аналогичных распределений, построенных по литературным данным, следует, что большой разброс диаметров стримеров является неизбежным эффектом, который не может

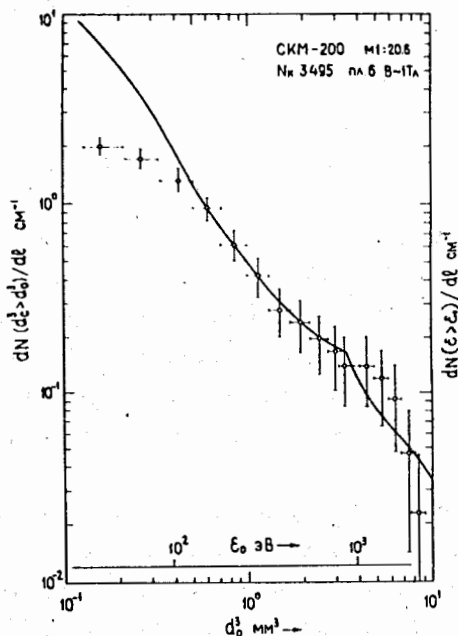


Рис. 3. Интегральные распределения плотностей стримеров по их диаметрам $dN(d_0^3 > d_0^3)/d d_0^3$ на следах релятивистских π^- -мезонов в камере СКМ-200 (магнитное поле напряженностью 1 Тл).

Сплошная линия - теоретическое распределение $dN(\epsilon > \epsilon_0)/d\epsilon$ в неупругих столкновениях однозарядной релятивистской частицы с атомами неона в минимуме ионизации при нормальных условиях. [Ermilova V.C., Kotenko L.P. and Merson G.I. Nucl. Justr. Meth. 145, №3, p.555(1977)]

быть объяснен только флуктуациями, возникающими в процессе развития стримеров. Он обусловлен вкладом электронных кластеров - сгустков вторичных электронов, инициированных отде-

льными δ -электронами (первичными электронами с энергией, достаточной для освобождения хотя бы еще одного электрона). Практически, все стримерные камеры имеют эффективный порог регистрации по кратности кластера значительно превышающий единицу, т.е. в основном регистрируются стримеры, развившиеся от следов δ -электронов. При этом плотность стримеров на следе однозначно определяется эффективным энергетическим порогом регистрации кластеров.

Обнаруженная связь структуры стримерного следа со спектром локальных ионизационных потерь расширяет возможности проведения ионизационных измерений в стримерной камере [20, 21].

ГЛАВА III посвящена разработкам и исследованиям методов и устройств формирования высоковольтных наносекундных импульсов для питания камер.

Тенденции развития камер требуют перехода к формированию импульсов с экстремальными параметрами по амплитуде, длительности и задержке в их подаче. В то же время для систем высоковольтного импульсного питания стримерной камеры, работающей в составе установки на ускорителе, одним из основных требований остается обеспечение бесперебойного многократного ($>10^5$) срабатывания камеры в течении всей длительности сеанса облучения. Нестабильность амплитуд импульсов при их постоянной форме на электродах не должна быть более 1-2%. Это заставляет выбирать те методы и схемы формирования импульсов, которые, в первую очередь, обеспечивают стабильную и устойчивую работу камеры во время всего сеанса облучения установки на пучке и отказываться от более сложных, обеспечивающих кратковременное улучшение характеристик импульсов, но ухудшающих условия стабильной работы. Для формирования требуемых импульсов существует ограниченное число методов и устройств. Это - заряд постоянным или импульсным напряжением накопителя энергии - конденсатора или формирующей линии и разряд их с помощью коммутатора - тиратрона или разрядника на нагрузку непосредственно либо через

линию передачи импульсов. С повышением требуемой амплитуды выходных импульсов практически удается использовать только импульсную зарядку накопителя с помощью, главным образом, генераторов импульсного напряжения - ГИН типа Аркадьева-Маркса и, реже, трансформаторов. Если для искровых камер, даже со сравнительно большим зазором 2-3 см, еще возможно использование в схемах формирования в качестве коммутаторов водородных тиратронов, то для широкозазорных и стримерных камер практически остается, по существу, один метод - коммутация емкости или линии на электродную систему камеры с помощью газового разрядника.

В процессе разработки и создания искровых, широкозазорных и стримерных камер, мы теоретически рассмотрели, осуществили и экспериментально проверили практически все указанные разновидности метода формирования импульсов на электродах камеры. В частности, разработаны двойная формирующая линия - ДФЛ и двоянная ДФЛ с общим разрядником и зарядкой от источников постоянного высокого напряжения. Первая из них использовалась для модели двухметровой стримерной камеры^{22/}, вторая - для предложенной нами четырехэлектродной камеры^{23/}. Эти разработки позволили получить наиболее стабильные по амплитуде импульсы с наименьшей задержкой. Они перспективны при создании быстродействующих генераторов для планируемых экспериментов со стримерной камерой на новом ускорителе ОИЯИ - Нуклотроне.

В § 3.2 дан анализ электрического импеданса системы электродов камеры, как участка полосковой (ленточной) линии. Здесь же отмечены преимущества вышеупомянутой четырехэлектродной камеры - снижение амплитуды импульсов относительно "земли", возможность размещения мишеней в области нулевого поля. В дальнейшем такие камеры получили распространение на ускорителях в Серпухове и ЦЕРН.

В §3.3 рассмотрены схемы формирования и разработанные нами устройства для питания искровых камер^{24/}, а так же методика расчета амплитуды импульсов на электродах этих камер.

Описанные устройства используются для запуска генераторов высоковольтных импульсов питания стримерных камер. Эти генераторы строятся по схеме формирования импульсов фиксированной длительности, определяемой электрической длиной формирующих линий. Анализ показал, что из-за неизбежного наличия индуктивности в коммутаторе, амплитуды эквивалентного прямоугольного импульса на выходах формирующей и двойной формирующих линий сравниваются, если отношение времени двойного пробега в линии T_L к постоянной времени коммутации T_K $T_L/T_K \cong 1.6$, т.е. при существенном сокращении длительности формируемых импульсов использование простой формирующей линии может оказаться предпочтительней^{15/} - рис. 4.

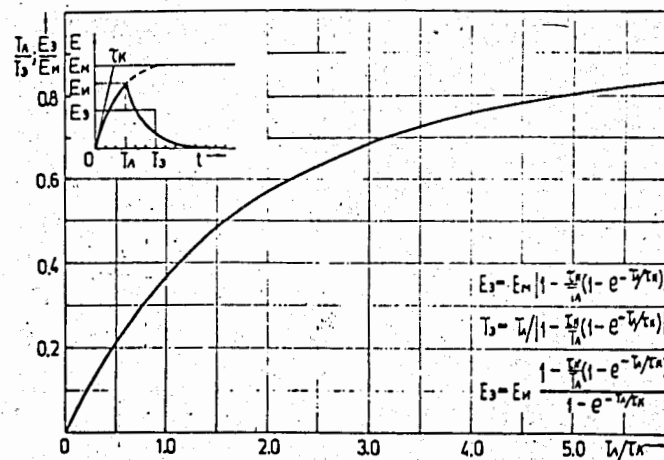


Рис. 4. Зависимости относительных значений длительностей импульсов T_L/T_3 и амплитуды E_3/E_M от отношения T_L к постоянной времени коммутации линии T_K : T_L, T_3, E_M, E_3 - соответственно; длительности и амплитуды импульсов на выходе формирующей линии и эквивалентных им импульсов прямоугольной формы.

В § 3.4 описан генератор высоковольтных импульсов, разработанный нами для питания двухметровой стримерной камеры ОИЯИ. Генератор выполнен по наиболее распространенной схеме питания больших стримерных камер, получившей название Блюмляйн-генератора или генератора с двойной формирующей линией. Отличительные особенности разработанного генератора - коаксиальная линия с коаксиальным разрядником, имеющим кольцевые выступы на отрицательном электроде для стабилизации амплитуды выходных импульсов. Генератор имел защитные кольца (в дальнейшем соленоид), окружающие колонку с конденсаторами ГИН, помещенную в цилиндрический кожух сравнительно небольших габаритов ^{/25-27/}. Генератор вместе с баком для трансформаторного масла и газовой аппаратурой размещался на подвижной тележке (рис. 5).

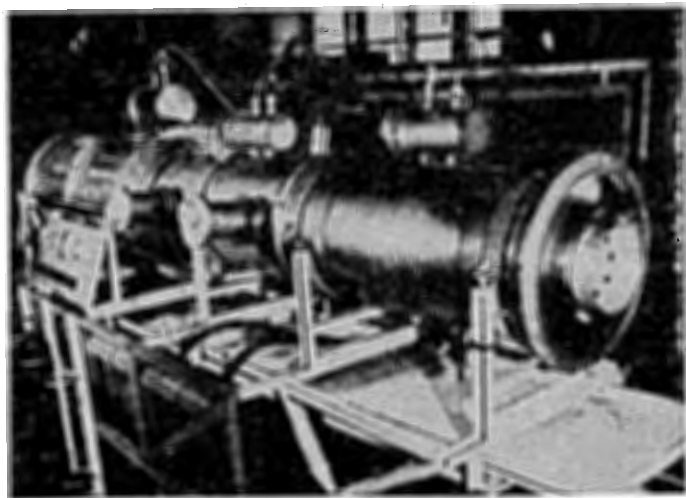


Рис. 5. Общий вид генератора высоковольтных наносекундных импульсов спектрометра СКМ-200.

Разрядники ГИН (10 ступеней) наполнялись азотом и углекислым газом под давлением ≈ 2 атм, разрядник линии - элегазом

≈ 2 атм. Амплитуда выходного напряжения на эквиваленте на грузки (36 Ом) достигала 700 кВ (для питания камеры достаточно ≈ 500 кВ) при длительности импульсов 12,5 нс.

В целом, с помощью разработанного генератора проведены все сеансы облучения СКМ-200 на синхрофазатроне ОИЯИ. На основе опыта использования этого генератора произведена разработка и создание системы высоковольтного импульсного питания новой установки - гибридного спектрометра со стримерной камерой - ГИБС.

В § 3.5 дано описание разработанных нами устройств, запуска генератора СКМ-200 и вспомогательной высоковольтной аппаратуры: блоков с металлокерамическими тиратронами типа ТГИ-1000/25, четырехканальных электронных стабилизаторов - потенциометров на напряжения 0 - 25 кВ и двухканальных до 100 кВ, а также высоковольтных импульсных и постоянноточных разъемов. ^{/28-31/}

В § 3.6 рассмотрены вопросы согласования импедансов в тракте формирования высоковольтных импульсов и приведены разработанные для этой цели оригинальные схемы ^{/32-34/}.

ГЛАВА IV посвящена разработкам аппаратуры контроля и управления работой камеры, обусловленных критичностью процесса образования стримерных следов частиц и его зависимостью от многих факторов.

Ко времени начала создания нами большой стримерной камеры ОИЯИ (1967 г.) многие важные вопросы ее работы - как связь размеров и световых выходов стримеров с параметрами импульса поля, значения амплитуды импульсов в рабочих режимах, ее допустимые флуктуации, были неясны. Поэтому нами были предприняты усилия по разработке соответствующей аппаратуры контроля, позволившей провести исследования стримерных камер и систем их питания на стенде и ускорителе.

Для измерения амплитуды импульсов были разработаны специальные расширители наносекундных импульсов ^{/35-38/} с выходом на цифровой вольтметр и выводом данных на печать. Эти расширители с комплектом разработанных широкополосных

высоковольтных делителей и разъемов позволили провести измерения амплитуд высоковольтных импульсов и контролировать стабильность их параметров (с разработанным измерителем задержки запуска) во всех сеансах облучения СКМ-200, а также получить первые результаты применения ЭВМ для контроля режимов работы камеры. /39-41/ В дальнейшем аппаратура использована на установке ГИЭС.

В § 4.3 рассмотрены вопросы регулировки состава рабочего газа в камере, являющегося существенным фактором, влияющим на стабильность режима ее работы. Расчетные и экспериментальные результаты разработки и осуществления систем газообеспечения камеры /42, 43/ показали, что оптимальным способом обеспечения постоянства состава газа в ней является создание потока рабочего газа заданного состава, т. е. газа, предварительно накопленного в достаточно большой емкости. В дальнейшем это было подтверждено опытом использования стримерной камеры для поиска кварков в ЦЕРН.

Анализ динамики продува газа оказалось удобным провести, представляя камеру электрической схемой - аналогом /44/. Это позволяет в наглядном виде интерпретировать процессы, связанные с характером изменения концентрации натекающего в камеру воздуха. Точную регулировку потока газа обеспечил импульсный регулятор /45/.

§ 4.4 посвящен времени памяти как одной из важнейших характеристик стримерной камеры и его регулированию. Необходимость установления оптимальной величины времени памяти камеры возрастает при работе в пучках частиц достаточно высокой интенсивности - 10^5 - 10^6 частиц/с.

Наиболее простым методом регулирования оказался метод, при котором изменяется скорость протока газа через камеру, а естественное натекание воздуха в нее снижает время памяти до требуемого уровня. Он и был реализован на установке СКМ-200.

Однако, при любом способе регулирования времени памяти стримерной камеры его измерение связано с получением и об-

работкой фотографий треков частиц для определения плотности стримеров. Поэтому возникла необходимость в оперативном бесфильмовом контроле и предварительном измерении времени памяти при подготовке камеры к сеансу облучения и непосредственно в ходе эксперимента. Новым способом такого контроля явился предложенный нами способ определения времени памяти стримерной камеры по характеристике эффективности искровой бесфильмовой камеры /46, 47/.

В § 4.5 дано краткое описание новых электронных методов контроля некоторых параметров стримеров - величин их сноса от траектории частицы по интегральным характеристикам высоковольтного импульса, а также их длин по току электронной компоненты в дополнительной камере. /48, 49/

В ГЛАВЕ V рассмотрены основные вопросы создания большой стримерной камеры для экспериментов на ускорителе /50-51/

В § 5.2 представлены результаты исследования модели двухметровой камеры ОИЯИ, позволившие проследить процессы развития стримеров в камере с фиксированной длительностью и стабилизированной величиной импульса электрического поля и конкретизировать требования к комплексу двухметровой камеры. /22/

В § 5.3 приведены результаты исследования двухметровой стримерной камеры на стенде /52, 53/. Электродная система камеры (рис. 6) представляла собой участок экранированной симметричной полосковой передающей линии, согласованной на конце резисторами типа ГВО-60 с результирующим сопротивлением 36 Ом. С помощью переходного устройства она присоединялась к коаксиальной двойной формирующей линии генератора высоковольтных импульсов. Верхний и центральный электроды камеры - проволочные, нижний - пластина из дюралюминия. Каркас и электроды камеры соединялись эпоксидным клеем. Окно для фотографирования следов (размеры 191×88 см²) в раме верхнего электрода было герметично затянуто пленкой из лавсана толщиной 0,175 мм. Объем камеры - 1 м³.

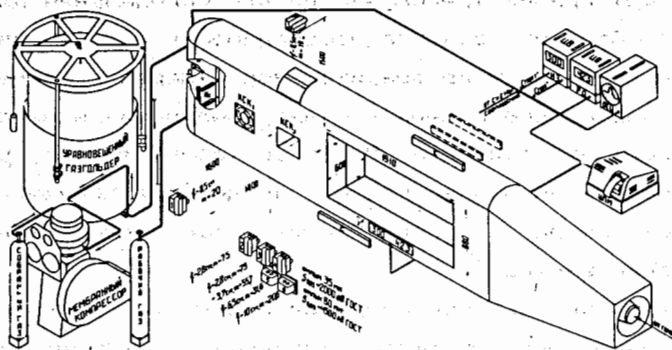


Рис. 6. Схема стендовых испытаний двухметровой стримерной камеры установки СКМ-200.

Амплитуда и задержка импульса постоянной длительности, поступающего от генератора непрерывно контролировалась с помощью специально разработанной для этой цели аппаратуры^{41/}, обеспечившей контроль стабильности амплитуды высоковольтного импульса на электродах камеры с погрешностью не более $\pm 0,2\%$.

Фотографирование рабочего объема камеры производилось пятью аппаратами, обеспечившими получение в различных масштабах снимков следов в проекциях в направлении электрического поля.

Регистрация развития стримерного процесса одновременно в двух проекциях (параллельно и перпендикулярно электрическому полю) осуществлялась двумя дополнительными аппаратами во вспомогательной (КСК-1) стримерной камере небольшого объема, включенной в общую линию передачи высоковольтного импульса питания камер.

Другая вспомогательная камера (КСК-2), сменные элект-

роды которой были изготовлены из проволок различного диаметра и с разным шагом, использовалась для уточнения условий возникновения электрической короны в рабочих условиях.

Запуск камеры на стенде осуществлялся при помощи 2-х пар сцинтилляционных счетчиков, регистрирующих космические частицы. Размеры сцинтилляторов $10 \times 80 \times 3 \text{ см}^3$. Счетчики устанавливались попарно сверху и внизу камеры в плоскости, параллельной электродам, и в процессе испытаний перемещались по глубине камеры так, чтобы можно было выделять различные участки ее рабочего объема.

Система газообеспечения камеры состояла из уравновешенного газгольдера, мембранного компрессора и баллонов для рабочего и протекшего через камеру газа.

Работа камеры подробно исследована при двух значениях длительности высоковольтного импульса. В одном случае импульс имел практически треугольную форму с длительностью на полувывоте 30 нс, в другом - форма импульса приближалась к полуволне синусоиды, а длительность составила 15,5 нс.

Всего было получено около 30 тыс. снимков, на которых следы частиц анализировались при помощи полуавтоматических измерительных микроскопов ПУОС.

Проведенные испытания позволили получить экспериментальную информацию о зависимостях световых выходов стримеров от длительности и амплитуды высоковольтного импульса, оптимизировать масштаб фотографирования камеры, уточнить величины напряженностей полей, соответствующих началу коронирования проволочных электродов, и проверить соответствие расчетных и экспериментальных данных.

В § 5.4 описана установка с двухметровой стримерной камерой в магнитном поле - СКМ-200.^{50,54/} Она была смонтирована в измерительном павильоне синхрофазатрона с таким расчетом, чтобы обеспечить возможность ее работы как в пучках протонов и релятивистских ядер, так и в пучках вторичных частиц - каонов и пионов. К концу 1979 года на этой установке было получено более 300 тыс. стереофотографий, из

которых около 200 тыс. - в пучках α -частиц с импульсом 17 ГэВ/с. Камера монтировалась в кожухе - экране, установленном на тележке, передвигаемой по уголковым направляющим, закрепленным в зазоре магнита с размерами полюсных наконечников $2000 \times 1000 \text{ мм}^2$. Пучок ускоренных частиц пропусклся через отверстие в экране и окно в стенке камеры затянутое лавсановой пленкой толщиной 50 мкм, расположенное на высоте 80 мм от среднего электрода. Внутри объема камеры на расстоянии 30-40 см от входного окна располагалась оригинальная сменная мишень из металлических и неметаллических веществ ^{55/}. Кроме того мишенью являлся и газ камеры.

Первые этапы исследований на установке предусматривали наблюдение всех взаимодействий α -частиц с мишенью. ^{56/}

Схема спектрометра приведена на рис. 7,

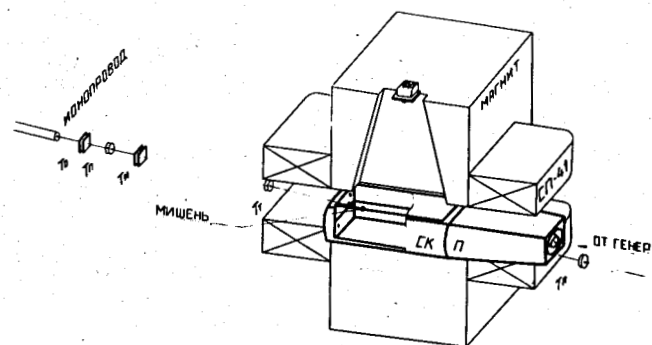


Рис. 7. Схема спектрометра SKM-200.

общий вид установки в измерительном павильоне синхрофазатрона дан на рис. 8.



Рис. 8. Общий вид установки SKM-200 в измерительном павильоне синхрофазатрона.

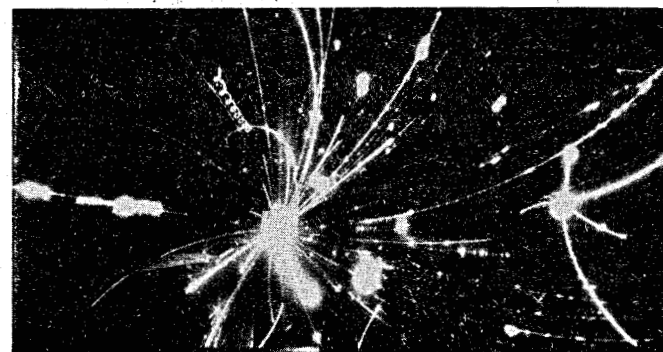


Рис. 9. Случай взаимодействия ядра кислорода со свинцом при первичном импульсе 4.5 ГэВ/с на нуклон (полный импульс падающего ядра 72 ГэВ/с).

На рис. 9 приведены картины взаимодействий, зарегистрирован-

ных в пучке релятивистских α -частиц.

Сравнительные значения массы Λ -частиц, полученные при обработке материалов СКМ-200, приведены на рис.10.

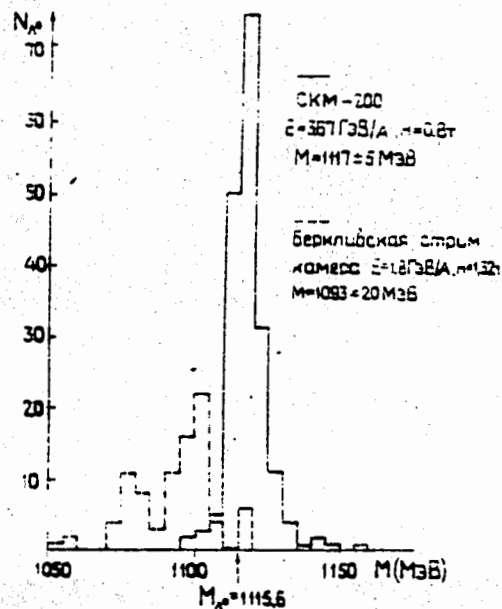


Рис.10. Распределение эффективных масс Λ -гиперонов (Оконов Э.О., ОИЯИ, 8309, Дубна, 1974, с.104).

В ГЛАВЕ VI приведены основные результаты, полученные с нашим участием при использовании искровых и стримерных камер на синхрофазатроне.

В §6.2 даны результаты поиска редких мод распадов нейтральных резонансов.

По существовавшим в 60-70 годы представлениям векторные мезоны ρ, ϕ, ω занимали в физике адронов положение, аналогичное положению фотона в электродинамике, и исследование их свойств явилось одной из центральных задач физики высо-

ких энергий (модель векторной доминантности).

Предполагалось, что взаимодействия ρ, ω, ϕ - мезонов с адронами представляли собой разновидности фундаментальных процессов.

Схема оригинальной установки, примененной для исследования этих процессов, описана в § 1.5. С ее помощью было проведено 2 серии облучений при двух значениях угла между осями каналов 26° и 29° . Общее число π^- мезонов, пропущенных через жидководородную мишень, составило $6 \cdot 10^9$.

В результате было доказано существование распадов $\rho^0 \rightarrow e^+e^-$ и $\phi \rightarrow e^+e^-$, определены относительные их вероятности - $(4,4 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$ и $(61 \pm 26) \cdot 10^{-5}$ соответственно, а также константы связи $g^2 \rho / 4\pi = 2,6 \pm 0,6$ и $g^2 \phi / 4\pi = 5,2 \pm 2,9$; Измерена масса фи-ноль мезона: $m_\phi^* = (1012 \pm 18)$ МэВ, были измерены также средняя масса и ширина ρ^0 -мезона: $m_\rho^* = (762 \pm 12)$ МэВ, $\Gamma_\rho = (120 \pm 20)$ МэВ, соответственно. Эти полученные данные близки к современным табличным значениям. В 1967 г. эти результаты оказались своевременными и фундаментальными в смысле подтверждения модели векторной доминантности во взаимодействиях адронов и в последующем переходе к глюонной доминантности в квантовой хромодинамике.

Явление распада ϕ^0 -мезона на e^+e^- - пару стало предметом открытия, диплом за №94, Гос.реестр.12.01.1971 г. с приоритетом от 11. 1967 г. /9/

В § 6.3 описаны результаты исследований многочастичных процессов взаимодействия ядер при релятивистских энергиях, полученные с большой стримерной камерой в магнитном поле СКМ-200 на синхрофазатроне.

Ядро-ядерные взаимодействия при высоких энергиях представляют физикам уникальную возможность изучения ядерной материи в экстремальных условиях больших плотностей, давлений, температур. Интерес физиков-теоретиков к этой проблеме особенно возрос в связи с предсказаниями о существовании новых состояний ядерной материи, например, кварк-глюонной плазмы. Поиск таких состояний и их возможных

проявлений требует детального анализа всех характеристик ядро-ядерных ($A_P + A_T$) столкновений и, в особенности, характеристик процессов рождения частиц.

Получение интенсивных моноэнергетических пучков релятивистских ядер, ускоренных на синхрофазатроне в Дубне до энергии 4А ГэВ, затем на Бэваллаке в Беркли - до 2,1 А ГэВ; в Брукхевенской национальной лаборатории - 14,5А ГэВ и на SPS в ЦЕРН - до 200А ГэВ, позволяет проводить статистически обеспеченные исследования ядро-ядерных взаимодействий в широком энергетическом интервале.

Стримерная камера, являясь управляемым трековым детектором, позволяет отбирать редкие события соударения ядер.

Спектрометр со стримерной камерой обеспечивает регистрацию сложной картины ядро-ядерных взаимодействий с высокой множественностью вторичных частиц (100-200 частиц на предел при регистрации), отбор редких событий, таких, как центральные взаимодействия, осуществляется с помощью гибкой системы триггера. Набор ядерно-чистых мишеней (включая металлические) расширяет класс изучаемых реакций.

Первые физические результаты дубненской установки СКМ-200 были получены в 1975 г., тогда как данные, полученные на установке со стримерной камерой в Беркли были опубликованы в 1978 г.; начиная с 1986 г. в ядерных пучках CERN использовалась стримерная камера в эксперименте NA-35.

В §6.4 отражается современное состояние методики стримерных камер и пути развития этих трековых детекторов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Создана двухканальная установка включающая черенковские γ -спектрометры и разработанные автором с сотрудниками широкоазорные искровые камеры. С помощью этой установки на синхрофазатроне ОИЯИ проведены поиски редких распадов векторных мезонов и открыт распад фи-ноль мезона на e^+e^- пару.

2. Предложена, создана и исследована двухметровая

стримерная камера - основа магнитного спектрометра СКМ-200 - для экспериментов в области релятивистской ядерной физики на синхрофазатроне ОИЯИ. Это первая в Европе большая камера, действовавшая на ускорителе. С помощью СКМ-200 в 1973-80 г.г. на синхрофазатроне получено более 300 тыс. снимков взаимодействий релятивистских ядер He, C, Ne, O с импульсом 4,5 ГэВ/с на нуклон с ядрами мишеней ^7Li , C, Al, Cu, Zr, Pb, что позволило исследовать основные характеристики вторичных частиц, в том числе и странных.

3. В процессе разработки и создания магнитного спектрометра со стримерной камерой, двухканальной установки с широкоазорными искровыми камерами и установки для изучения рассеяния π^+ -мезонов на большие углы нами впервые предложены и осуществлены:

- трехэлектродная стримерная камера с внутренними проволочными электродами, ставшая прототипом трехэлектродных камер, действовавших в составе экспериментальных установок на ускорителе DESY и ОИЯИ;

- модель двухметровой стримерной камеры с коаксиальной двойной формирующей линией, питаемой постоянным напряжением через оригинальный электронный стабилизатор с выходным напряжением +100 кВ, что позволило провести детальные исследования стримерного процесса при прямом фотографировании треков;

- четырехэлектродная стримерная камера, получившая в дальнейшем распространение на ускорителях ИФВЭ и CERN;

- искровые камеры с двойными проволочными электродами, последовательное питание узкоазорных искровых камер как со сплошными, так и проволочными электродами, что обеспечивает повышение эффективности регистрации камерой многих треков одновременно.

4. Предложены, разработаны и использованы в установках:

- генераторы для кабельного питания искровых камер на основе импульсных водородных тиратронов и воздушных разряд-

ников с выходным импульсным напряжением до 180 - 200 кВ, работающие от источников постоянного напряжения 20-30 кВ через специально созданные электронные стабилизаторы - потенциометры высокого напряжения: 4-х канальные с выходным напряжением 0 - 25 кВ и 2-х канальные 0 - 100 кВ, что позволило в широких пределах по нескольким каналам регулировать амплитуды выходных импульсов генераторов и иметь стабильные значения амплитуд импульсов на электродах камер;

- генератор с коаксиальной двойной формирующей линией для питания двухметровой стримерной камеры СКМ-200 с выходным напряжением до 700 кВ, длительностью импульсов $\sim 12,5$ нс, задержкой ~ 500 нс, ресурсом ~ 150 тыс. срабатываний.

- высоковольтные широкополосные импульсные и постоянно-точные соединители и делители.

5. Для контроля и управления предложены, осуществлены и использованы в действующих установках со стримерными и искровыми камерами:

- оригинальная аппаратура измерения амплитуд одиночных наносекундных импульсов в диапазоне до 500 кВ и выше, работающая в условиях сильных электромагнитных помех;

- оригинальная аппаратура контроля времени памяти стримерной камеры по характеристикам дополнительной искровой камеры, обеспечивающая дистанционное бесфильмовое измерение времени памяти стримерной камеры;

- импульсная система регулировки потока газа через стримерную камеру для точной дозировки газа, подаваемого в камеру.

6. При выборе и осуществлении высоковольтной и контрольно-измерительной аппаратуры впервые предложены и разработаны:

- методика расчета напряжений на кабельных выходах импульсных генераторов с водородными тиратронами и воздушными разрядниками в зависимости от величин нагрузки и накопительной емкости;

- новые схемы согласования импедансов в тракте форми-

рования высоковольтных импульсов

- новые методы контроля импульсов двойной формирующей линии путем измерения интегральных характеристик выходного импульса и предимпульса, обеспечивающее более объективные характеристики импульса питания стримерной камеры;

- методика представления импульса произвольной формы, прикладываемого к электродам камеры, в виде эквивалентного по действию прямоугольного импульса.

7. Предложены и обоснованы оригинальные электронные методы контроля длин стримеров и их сноса от траектории частицы.

8. Предложена и разработана "энергетическая" модель лавинного процесса, хорошо описывающая нарастание светового излучения и размеров электронной лавины в газе под действием электрического поля. Модель базируется на определяющей роли энергии, запасаемой лавиной при ее развитии в виде собственной энергии зарядов лавины и энергии их взаимодействия. Модель не только объясняет, но и предсказывает экспериментально наблюдаемые количественные зависимости поперечных размеров и поверхностной плотности излучения стримеров от потерь энергии частицей в индивидуальных столкновениях с атомами газа в местах последующего образования стримеров.

9. Полученные нами при обработке снимков с нескольких стримерных камер интегральные распределения диаметров стримеров свидетельствуют о том, что большой разброс диаметров стримеров является неизбежным эффектом, который обусловлен вкладом электронных кластеров, образованных отдельными δ -электронами (первичными электронами с энергией достаточной для освобождения хотя бы еще одного электрона).

Проанализированные экспериментальные данные о регистрации стримеров на следе частицы, т. е. о регистрации надпороговой части спектра локальных ионизационных потерь энергии в индивидуальном столкновении частицы с атомами газа камеры, не противоречат предположению о том, что стримерная

камера является, фактически, линейным усилителем ионизации, т.к. число образующихся электронов в стримере пропорционально кратности кластера. Наблюдаемая на следе плотность стримеров однозначно определяется эффективным энергетическим порогом регистрации.

10. По своим свойствам - регистрация сложной картины ядро-ядерных взаимодействий в 4 π -геометрии с числом вторичных частиц более 100, высокая точность определения импульсов и углов частиц, превышающая соответствующие величины для жидководородных камер, размещение в рабочем объеме камеры ядерно чистых мишеней практически из любых веществ, в том числе металлов, в сочетании с эффективными триггерными устройствами - стримерная камера является, пожалуй самым универсальным и весьма эффективным физическим прибором из класса трековых детекторов.

В результате выполненного цикла исследований создана экспериментальная база и разработана основа для эффективного использования искровых и больших стримерных камер в крупных экспериментальных установках, действовавших на ускорителе. На этих установках получен большой экспериментальный материал по физике высоких энергий и релятивистской ядерной физике, который стал основой нескольких десятков совместных с другими институтами стран участниц ОИЯИ научных публикаций и открытий.

Работы, положенные в основу диссертации.

1. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин. О применении дебаевского приближения к переходу лавины в стример. Препринт ОИЯИ, P13-5504, Дубна, 1970.
2. Глаголева Н. С., Ю. Р. Лукстиньш, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Влияние параметров высоковольтного импульса на геометрические и яркостные характеристики стримера в стримерной камере. Сообщения ОИЯИ, P13-7791, Дубна, 1974.
3. Guskov B.N., I.Gladky, A.T.Matyushin et al. Spark chambers for Measurements of Elastic Backward Scattering of Position Pions by Protons. *Czech. J. Phys.*, 1967, v.17B, p.274. Препринт ОИЯИ, P-2506, Дубна, 1965.
4. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин, Л. В. Сильвестров. Анализ некоторых характеристик искровых камер. Препринт ОИЯИ, 13-3518, Дубна, 1967.
5. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин, Р. Фирковский. Некоторые результаты анализа эффективности регистрации искровой камеры. В книге: "Материалы совещания по бесфильмовым искровым и стримерным камерам." ОИЯИ, 13-4527, Дубна, 1969, с.305.
6. Azimov M.A., A.S.Belousov, ... A.T.Matyushin et al. A method of Effective Mass Measurements in the Decays: $\pi^0 \rightarrow e^+e^-$, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, etc. In Proc. of the 1966, Intern. Conf. for High Energy Phys. Proc. Standard Univ. Springfield, USA, 1966, p.601.
7. Глаголева Н. С., Г. Даминов, Ю. А. Каржавин, А. Т. Матюшин и др. Блочная система питания, управления и контроля искровых камер с промежутком 1-15 см для экспериментов на ускорителе. Препринт ОИЯИ, 13-3219, Дубна 1967.
8. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин, Р. Фирковский, М. Н. Хачатурян, М. С. Хвастунов. Искровые камеры с зазором 10 см в установке для исследования радиационных распадов резонансов. Препринт ОИЯИ, 13 - 3220, Дубна, 1967, ПТЭ, №2, 1968, с.51.
9. Азимов М. А., Р. Г. Аствацатуров, А. М. Балдин, ... А. Т. Матюшин.

Экспериментальное обнаружение неизвестного ранее явления распада ϕ -ноль мезона на электрон - позитронную пару, указывающее на существование прямых переходов между ϕ -ноль мезоном и γ - квантом. -Диплом на открытие №94. Гос.реестр 12.01.71 с приоритетом - февраль 1967.

10. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин. Электрическое поле проволочных электродов искровой камеры. - ОИЯИ, P2364, Дубна, 1965. В кн. "Симпозиум по ядерной электронике ОИЯИ" 3, Rossendorf, 1965, Dresden, 1966(7ФК121), с.126.

11. Гуськов Б. Н., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин, Р. Фирковский. Симметричная система "двойных" проволочных электродов искровой камеры. Препринт ОИЯИ, Дубна, 13-2958, 1966, ПТЭ, 1967, №2, с. 42.

12. Гуськов Б. Н., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Последовательное питание промежутков искровой камеры. Препринт ОИЯИ, P-1937, Дубна, 1965, ПТЭ, 1966, №1, с. 80.

13. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин. Симметричная система проволочных электродов изотропной искровой камеры. Препринт ОИЯИ, P2312, Дубна, 1965, ПТЭ, 1966, №5, с.75.

14. Аксиненко В. Д., В. Д. Володин, ... А. Т. Матюшин и др. Система высоковольтного импульсного питания стримерной камеры установки СКМ-200 и трековых искровых камер установки Адрон-44. Депон. публ. ОИЯИ, Б1-13-10574, 1976, с.19.

15. Аксиненко В. Д., Н. С. Глаголева, ... А. Т. Матюшин и др. Эквивалентный прямоугольный импульс высоковольтного питания стримерной камеры. Сообщения ОИЯИ, 13-83-436, Дубна, 1983.

16. Абдурахимов А. У., В. Д. Аксиненко, А. Т. Матюшин и др. Разрешающая способность стримерного спектрометра. Депон. публ. ОИЯИ, Б2-1-85-94, Дубна, 1984.

17. Володин В. Д., Н. С. Глаголева ... А. Т. Матюшин и др. Стримерные следы электронов в неоне, находящемся под давлением. Препринт ОИЯИ, P1-82-40, Дубна, 1982; ПТЭ, 1983, №4, с.60.

18. Н. С. Глаголева, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин и др. Способ получения треков в газоразрядном трековом детекторе-

Авторское св-во СССР на изобретение №932898 от 3.10.1978. Бюлл. ОИПОТЭ, 1982, №10.

19. Глаголева Н. С., А. Т. Матюшин, Н. Н. Нургожин. Энергетическая модель нарастания излучения и размеров электронной лавины в стримерной камере. Сообщения ОИЯИ, P1-83-328, Дубна, 1983.

Glagoleva N.S., A.T.Matyushin, V.T.Matyushin, N.N.Nurgoshin, Electrostatic Avalanche Energy and Streamer Chamber Resolution- представлена на Intern. Conf. for High Energy Physics, Breaton, England, 1983.

20. Аксиненко В. Д., Н. С. Глаголева, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин, И. С. Саитов. Способ определения ионизирующей способности частиц в стримерной камере. - Авторское свидетельство на изобретение СССР №1599820 с приоритетом от 15 июня 1990 г.

21. В. Д. Аксиненко, Н. С. Глаголева, ... А. Т. Матюшин, О. Ю. Мандрик и др. Исследование распределений по диаметру стримеров, образованных релятивистскими однозарядными частицами в стримерной камере. Сообщения ОИЯИ, Дубна, P1-92-263, 1992.

22. Володин В. Д., Н. С. Глаголева, ... А. Т. Матюшин и др. Исследование модели двухметровой стримерной камеры установки СКМ - 200. Препринт ОИЯИ, P13-5529, Дубна, 1970, ПТЭ, 1971, №5, с.62.

23. Володин В. Д., Н. С. Глаголева, Н. И. Каминский, А. Т. Матюшин и др. Четырехэлектродная стримерная камера. Препринт ОИЯИ, P13-10380, Дубна, 1977, ПТЭ, 1978, №3, с.66.

24. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин, Р. Фирковский, М. Н. Хачатурян. Генераторы высоковольтных импульсов для кабельного питания искровых камер с промежутком 1-15см. Препринт ОИЯИ, 13-3264, Дубна, 1967, ПТЭ, 1968, №2, с.119. В кн. "Симпозиум по наносекундной ядерной электронике", Дубна, 1967, Материалы, 1968, с.710.

25. Глаголева Н. С., В. Д. Володин, ... А. Т. Матюшин и др. Генератор высоковольтных импульсов двухметровой стримерной камеры. Препринт ОИЯИ, 13-7792, Дубна, 1974, ПТЭ, 1975, №5, с.99.

26. Володин В. Д., Н. С. Глаголева, Н. И. Каминский, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. -Высоковольтный генератор импульсных напряжений с защитным соленоидом. - Препринт ОИЯИ, Р13-10599. 1977, ПТЭ, N5, с.121, 1978.
27. Каминский Н. И., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин, В. Д. Володин. Генератор импульсных напряжений. - Авторское свидетельство СССР на изобретение N553733 с приоритетом от 29.04.75 г., ОИПОТЗ, 1977, N13, с.214.
28. Володин В. Д., П. С. Кузнецов, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Сокращение и стабилизация задержки генератора высоковольтных импульсов на водородном тиратроне. Препринт ОИЯИ, 1-6734, Дубна, 1972, ПТЭ, 1973, N3, с.173.
29. Глаголева Н. С., П. С. Кузнецов, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин и др. Четырехканальный источник высокого напряжения со стабилизацией, регулировкой в диапазоне 0-25 кВ и импульсной блокировкой. В кн. "Материалы совещания по бесфильмовым и стримерным камерам." ОИЯИ, 13-4527, Дубна, 1969, с.310.
30. Володин В. Д., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин Р. Фирковский. Двухканальный электронный стабилизатор - потенциометр высокого напряжения для системы формирования высоковольтного импульса установки СКМ-200. В "Матер. совещания по бесфильмовым искровым и стримерным камерам". ОИЯИ, 13-4527, Дубна, 1969, с.23, ПТЭ, N3, 1970, с.277.
31. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин, В. Я. Рубцов. Электрический разъем. Авторское свидетельство на изобретение СССР N259219, с приоритетом от 30 июля 1968 г., ОИПОТЗ, N2, 1970, с.65.
32. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин. Импульсный резонансный формирующий трансформатор. Авторское свидетельство на изобретение СССР N790150, с приоритетом от 31 июля 1978г., ОИПОТЗ N47, 1980, с.257.
33. Аксиненко В. Д., Н. И. Каминский, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Импульсный резонансный формирующий трансформатор. Авторское свидетельство на изобретение СССР N871311, с приоритетом от 24 декабря 1979 г., ОИПОТЗ N37, 1981, с.280.

34. Аксиненко В. Д., Е. А. Дементьев, А. Т. Матюшин и др. Генератор импульсов - Авторское свидетельство СССР на изобретение N989747 от 3 июня 1981 г., ОИПОТЗ N2, 1983, с.259.
35. Глаголева Н. С., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Цифровой пиковый вольтметр для контроля высоковольтного импульса стримерной камеры установки СКМ-200. - В "Материалах совещания по бесфильмовым искровым и стримерным камерам", ОИЯИ, 13-4527, Дубна, 1969, с.30.
36. Глаголева Н. С., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Расширитель импульсов. Авторское свидетельство СССР на изобретение N371678, с приоритетом от 25 июня 1971 г., ОИПОТЗ, 1973, N12, с.165.
37. Глаголева Н. С., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Расширитель импульсов. Авторское свидетельство СССР N509989, с приоритетом от 24 июля 1974 г., ОИПОТЗ, 1976, N13, с.176.
38. Володин В. Д., Н. С. Глаголева, А. Т. Матюшин и др. Аппаратура контроля режима двухметровой стримерной камеры. Препринт ОИЯИ, Р13-7811, Дубна, 1974.
39. Астахов А. Я., В. Д. Володин, ... А. Т. Матюшин и др. Проект развития и комплексной автоматизации установки СКМ-200 на 1976-1980 гг. Депонир. публ. ОИЯИ, Б1-13-11288, Дубна, 1978.
40. Глаголева Н. С., З. Замори, ... А. Т. Матюшин и др. Система КАМАК для связи аппаратуры контроля стримерной камеры установки СКМ-200 с ТПА-1001i. Депонир. публ. ОИЯИ, Б1-13-11289, Дубна, 1978.
41. Глаголева Н. С., З. Замори, ... А. Т. Матюшин и др. Система контроля электрического режима стримерной камеры на базе ЭВМ ТПА-1001i. В кн. "Всесоюзное совещание по автоматизации научных исследований в ядерной физике," 2-е; Алма-Ата, 1978, Тезисы докладов, Алма-Ата, Наука, 1978, с.108.
42. Краснов С. А., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Система газообеспечения большой стримерной камеры в магнитном поле для исследований K^0 -мезонов на У-70. - ОИЯИ, Б1-13-3999.

Дубна, 1968.

Краснов С. А., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Система газообеспечения стримерной камеры установки СКМ-200. В кн. "Материалы совещания по бесфильмовым искровым и стримерным камерам", Дубна, 1969, ОИЯИ, 13-4527, с.19.

43. Белякин В. М., С. М. Битжибаев, ... А. Т. Матюшин и др. Система газообеспечения стримерных и трековых камер большого объема СК-Б0. - ОИЯИ, Б1-13-7793, Дубна, 1974; Сообщения ОИЯИ, 13-7878, Дубна, 1974.

44. Матюшин А. Т., В. Т. Матюшин, Х. Х. Мусульманбеков, Н. Н. Нургожин. Процесс продува при газообеспечении стримерной камеры. Препринт ОИЯИ, 13-9563, Дубна, 1976 г., ПТЭ, 1977, N1, с. 35.

45. Глаголева Н. С., Е. А. Дементьев, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Импульсный регулятор газового потока стримерной камеры. - Препринт ОИЯИ, P13-12526, Дубна, 1979, ПТЭ, 1981, N3, с. 227.

46. Володин В. Д., Н. С. Глаголева, ... А. Т. Матюшин и др. Бесфильмовый метод контроля времени памяти стримерной камеры. - Препринт ОИЯИ, P13-10474, Дубна, 1977, ПТЭ, 1978, N4, с. 54.

47. Володин В. Д., Н. С. Глаголева, А. Т. Матюшин и др. Устройство для контроля и измерения времени памяти стримерной камеры. Авторское свидетельство СССР на изобретение N586221, с приоритетом от 24 марта 1976 г., ОИПОТЗ, 1977, N27, с. 137.

48. Глаголева Н. С., Е. А. Дементьев, А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Способ определения длины стримеров в стримерной камере. - Авторское свидетельство СССР на изобретение N845671, с приоритетом от 1 февраля 1980 г., ОИПОТЗ, 1981, N25, с. 253.

49. Глаголева Н. С., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин. Способ получения треков в газоразрядном трековом детекторе. Авторское свидетельство на изобретение СССР N932898, с приоритетом от 3 октября 1978 г., ОИПОТЗ, 1984, N10.

50. Аникина М. Х., А. М. Балдин, ... А. Т. Матюшин. Установка с большой стримерной камерой в магнитном поле СКМ-200. В кн.:

"Совещание по бесфильмовым искровым и стримерным камерам", ОИЯИ, 13-4527, Дубна, 1969, с.11.

51. Vardenga G.L., V.D.Volodin, ... A.T.Matyushin et al. The JINR 2-meter Streamer Chamber. In: 1973 г. Int. Conf. on Appl. Instr. for High Energy Phys., Frascati, Italy, 1973 г., Proc., p.157.

52. Володин В. Д., Н. С. Глаголева, ... А. Т. Матюшин и др. Особенности фоторегистрации стримеров в стримерной камере. Депонир. публ. ОИЯИ, Б1-13-8985, Дубна, 1975.

53. Варденга Г. Л., В. Д. Володин, Н. С. Глаголева, ... А. Т. Матюшин и др. Двухметровая стримерная камера для исследований в области релятивистской ядерной физики. Результаты стендовых испытаний. Сообщения ОИЯИ, P13-9315, Дубна, 1975.

54. Абдурахимов А. У., М. Х. Аникина, ... А. Т. Матюшин и др. Установка с двухметровой стримерной камерой в магнитном поле СКМ-200. - Препринт ОИЯИ, 13-10692, Дубна, 1977, ПТЭ, 1978, N5, с. 53.

55. Лукстиньш Ю., А. Т. Матюшин, В. Т. Матюшин, Ю. П. Яковлев. Стримерная камера. - Авторское свидетельство СССР на изобретение N1028170. ОИПОТЗ, N29, 1984, с приоритетом от 31.07.1975.

56. Аникина М. Х., А. М. Балдин, ... А. Т. Матюшин и др. Облучение установки СКМ-200 в пучке α -частиц с импульсом 17 Гэв/с и результаты предварительного анализа α Li и α Ne взаимодействий. Сообщения ОИЯИ, 1-9280, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 сентября 1993 года.