

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-96-214

A-941

На правах рукописи  
УДК 539.1.174  
539.126.343

АФАНАСЬЕВ  
Сергей Владимирович

РАЗРАБОТКА  
И СОЗДАНИЕ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА СФЕРА,  
ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
НА ПУЧКАХ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА  
ЛВЭ ОИЯИ

На стыке специальностей: 01.04.01 — техника  
физического эксперимента, физика приборов,  
автоматизация физических исследований  
и 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Александр Иванович  
МАЛАХОВ

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Юрий Анатольевич  
ПАНЕБРАТЦЕВ

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Олег Октябrevич  
ПАТАРАКИН

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г.Москва

Защита диссертации состоялась "10" X 1996 года  
в "      " часов на заседании специализированного совета Д-047.01.02 в  
Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "29" VII 1996 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета доктор физ.-мат. наук, профессор *М.Ф.Лихачев* М.Ф.Лихачев

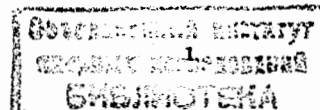
## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Проявление кварковой структуры ядер в области нескольких ГэВ тесно связано с рождением частиц в кинематически запрещенной области для свободных нуклон-нуклонных соударений, т. е. кумулятивных частиц. К настоящему времени изучены подробно многие закономерности рождения кумулятивных адронов в инклюзивных процессах, но в плане их теоретической интерпретации остается много неопределенностей из-за ограниченности инклюзивного метода постановки эксперимента. В связи с этим необходимо проводить одновременное измерение всех продуктов реакции. Это позволит получить данные при разных степенях неупругости реакции и детально сравнить их с предсказаниями различных моделей. Для регистрации продуктов реакции в условиях близкой к 4- $\pi$  геометрии, в ЛВЭ ОИЯИ создается универсальная установка СФЕРА.

**Целью работы** является создание детектирующей аппаратуры для оснащения переднего спектрометра установки СФЕРА, разработка новых типов детекторов для центрального спектрометра установки СФЕРА, создание сцинтилляционного спектрометра для обеспечения первых экспериментов на внутренней мишени нового сверхпроводящего ускорителя Нуклотрона, проведение исследований дейтрон-ядерных взаимодействий при энергии 4,5 ГэВ на нуклон, исследование поведения дифференциальных сечений образования кумулятивных протонов в дейтрон-ядерных взаимодействиях при изменении первичной энергии дейтронов от 0,7 до 2 ГэВ на нуклон.

## Научная новизна работы

- Впервые проведены эксперименты на внутренней мишени сверхпроводящего ускорителя ядер Нуклотрона.
- Впервые предложен и апробирован метод улучшения координатного разрешения калориметрического модуля типа "сэндвич" при регистрации адронов.
- Исследована зависимость рождения кумулятивных пионов под углом  $0^0$  в дейтрон ядерном взаимодействии от атомного веса мишени.



**Научно-практическая значимость работы.** Исследование  $A^\alpha$ -зависимости образования  $\pi^-$ -мезона под углом  $0^\circ$  вблизи кинематической границы дало значение  $\alpha = 0,27 \pm 0,09$ , что может быть использовано для выбора теоретических моделей, описывающих процессы образования кумулятивных частиц.

Результаты, полученные в процессе исследований наклонов спектров кумулятивных протонов в области энергий сталкивающихся ядер от 0,7 до 2,0 ГэВ на нуклон, дополняют имеющиеся данные для адрон-ядерных взаимодействий.

Полученный опыт постановки эксперимента на внутренней мишени сверхпроводящего ускорителя ядер может быть использован для проведения исследований на других подобных ускорителях.

**Апробация работы и публикации.** Результаты, лежащие в основе диссертации, были доложены на семинарах по релятивистской ядерной физике ЛВЭ, рабочих совещаний коллаборации СФЕРА, Международном совещании Дейтрон-95, XI и XII Международных семинарах по проблемам физики высоких энергий и КХД (Дубна, 1992 г., 1994 г.)

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-12], список которых приведен в конце автореферата.

**Объем и структура работы.** Работа изложена на 99 страницах, состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 68 рисунков, 4 таблицы и список цитируемой литературы из 105 наименований.

#### **Автор защищает следующие основные результаты**

1. Создана время-пролетная система переднего спектрометра установки СФЕРА площадью  $4\text{ м}^2$ , позволяющая проводить разделение вторичных частиц по разности времен пролета до 400 пс.
2. Разработаны модули электромагнитного калориметра для оснащения центрального спектрометра установки СФЕРА.
3. Разработан и создан сцинтилляционный спектрометр для экспериментов на внутренней мишени сверхпроводящего ускорителя Нуклотрона.
4. Измерены и проанализированы наклоны спектров кумулятивных протонов в дейтрон-ядерных взаимодействиях при энергиях от 0,7 до 2 ГэВ на нуклон.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы основные цели работы, изложены основные положения, которые выносятся на защиту и приводится краткое содержание диссертации по главам.

**В первой главе** представлены результаты работ по разработке и созданию детекторов для создаваемой в Лаборатории высоких энергий универсальной установки СФЕРА.

В начале главы кратко изложена физическая проблематика эксперимента СФЕРА, где обосновывается необходимость комплексного исследования механизма образования кумулятивных частиц. Представлена концепция создания экспериментальной установки. Приводится состав детектирующей аппаратуры, необходимой для выполнения поставленных задач.

Далее приведены результаты работ, выполненных в процессе создания переднего спектрометра установки СФЕРА и методические исследования, посвященные разработке детекторов для центрального спектрометра установки СФЕРА.

**Вершинный годоскоп переднего спектрометра.** Описываемый сцинтилляционный годоскоп Н0 собран из 2-х одинаковых пар взаимно перпендикулярных плоскостей (X,Y)- модуль Н01 и (U,V) - модуль Н02, плотно подогнанных друг к другу, причем один модуль повернут относительно другого на  $45^\circ$  для определения соответствия отметок в X и Y плоскостях при регистрации нескольких частиц одновременно. Каждую из плоскостей годоскопа Н0 образуют 16 сцинтилляционных пластин размером  $3 \times 9 \times 18\text{ мм}^3$ , просматриваемых с одного торца фотоумножителем.

Путем оптимизации питания фотоэлектронного умножителя удалось достичь работоспособности детектора в условиях, когда на элемент годоскопа приходится до  $2 \times 10^7$  частиц в секунду.

Эффективность всего годоскопа Н0 измерилась на пучке дейтронов с импульсом 4,5 Гэв/с. Полная эффективность модуля годоскопа составила 96% (Н01) – 97% (Н02).

**Время-пролетная система переднего спектрометра.** Время-пролетная система (ТОФ) была разработана и создана для идентификации вторичных частиц по разнице их скоростей в переднем спектрометре

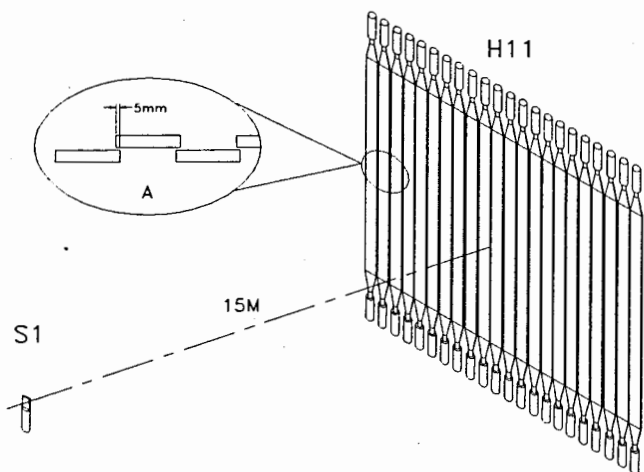


Рис. 1: Схематический вид время-пролетной системы.

установки СФЕРА. Ее основу составляет 22-элементный сцинтиляционный годоскоп  $H_{11}$  (рис.1), который используется как для получения временной отметки, так и для амплитудного анализа.

Годоскоп  $H_{11}$  состоит из 22 независимых счетчиков суммарной площадью  $4 \text{ м}^2$ . Для уменьшения геометрической неэффективности сцинтилляторы установлены с 5-мм перекрытием относительно друг друга. Все 22 элемента одинаковые и представляют собой сцинтиллятор длиной 2,5 м и  $100 \times 10 \text{ мм}$  в сечении, просматриваемый с двух концов фотоэлектронными умножителями (ФЭУ-30)

Полосы были изготовлены из блочного полистирольного сцинтиллятора методом экструдирования. Это позволило изготовить монолитные пластины необходимой длины с малым затуханием света.

Особое внимание в работе было уделено оптимизации рабочего режима ФЭУ. Был осуществлен индивидуальный подбор делителей для каждого ФЭУ таким образом, чтобы обеспечить максимальную амплитуду импульса тока ФЭУ при минимальной временной дисперсии сигнала.

Временные и амплитудные параметры прототипа детектора были измерены на пучке релятивистских дейтронов Синхрофазотрона при импульсе  $P=6 \text{ ГэВ/с}$ . Время пролета, фиксируемое длинным сцинтиллятором, определялось следующим образом:

$$T = (T_u + T_d)/2 + C, \quad (1)$$

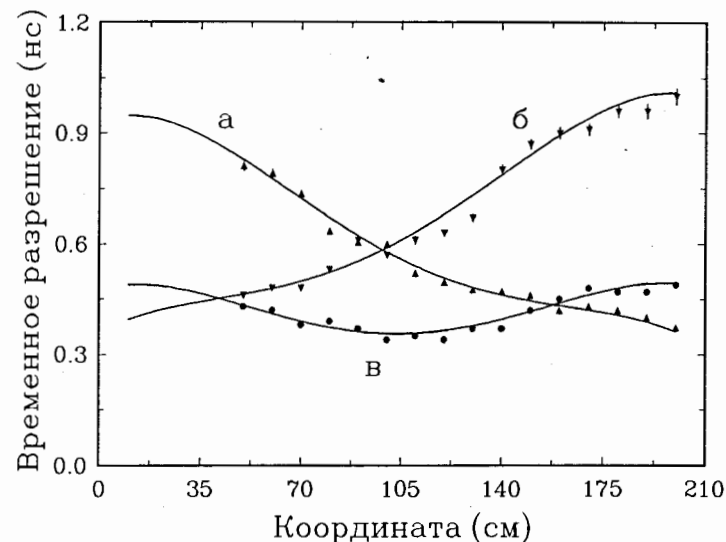


Рис. 2: Зависимость временного разрешения от места сцинтилляции

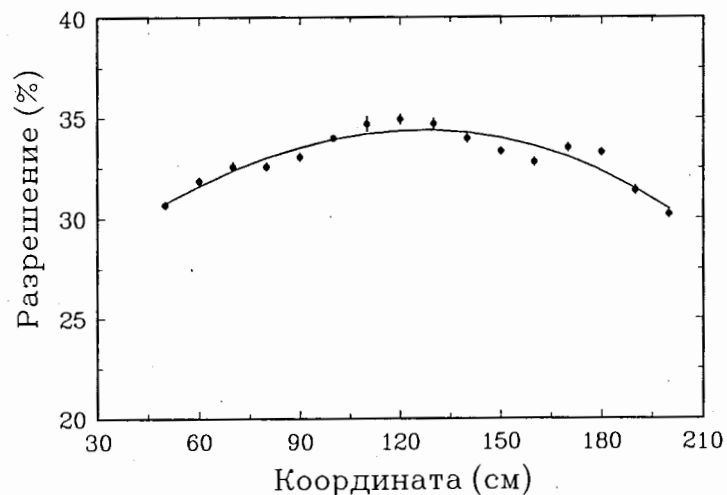
где  $T_u, T_d$  - время прихода сигнала с разных концов детектора,  $C$  - постоянная величина, включающая время распространения сигнала вдоль всего сцинтиллятора.

Измеренное временное разрешение в различных точках по длине детектора представлено на рис.2 (графики (а) и (б) для каждого ФЭУ по отдельности, (в) - для всего детектора). Среднее суммарное временное разрешение получилось равным  $400 \text{ пс}$  с разбросом по длине  $\pm 20\%$ .

Амплитудные параметры детектора оказались не столь критичны к координате. Суммарная амплитуда  $A$ , представленная как

$$A = (A_u + A_d)/2, \quad (2)$$

где  $A_u, A_d$  - амплитуда сигнала для верхней и нижней части соответственно, имеет практически постоянное значение. Неоднородность не превышает 5%. При этом амплитудное разрешение (рис.3), равное 35% в центре, улучшается к краям до 30% и в среднем равно 32%. Такие



**Рис. 3:** Зависимость амплитудного разрешения детектора от координаты

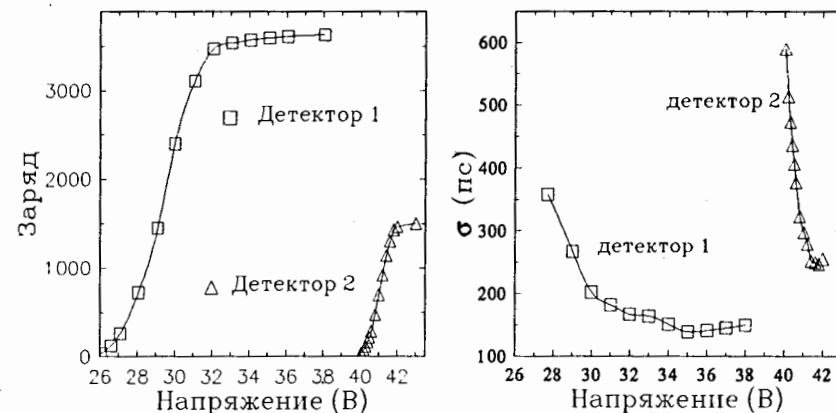
параметры являются типичными для сцинтилляционных счетчиков и позволяют использовать описываемый детектор не только для временного, но и для амплитудного анализа.

**Разработка время-пролетных детекторов для центрального спектрометра.** Для конструкции и типа детектора центрального спектрометра определяющим условием является ограниченность объема  $L \approx 1\text{м}$  и большое магнитное поле  $F \approx 1,5\text{Т}$ . Что, в конечном итоге, привело к исследованию временных свойств полупроводниковых диодов, как альтернативных ФЭУ светочувствительных приборов.

В работе исследовались временные свойства кремниевых лавинных фотодиодов с отрицательной обратной связью (SiAD).

Первые результаты по временному разрешению SiAD были получены с детектором площадью  $5 \times 5\text{мм}^2$ . Тест проводился с помощью радиоактивного  $\beta$ -источника  $^{106}\text{Ru}$  (максимальная энергия электронов 3,5 МэВ). Коллимированный пучок электронов проходил сквозь диод и два сцинтилляционных счетчика. С предусилителем, имеющим коэффициент усиления 7, временное разрешение получилось 630пс.

Подобные измерения были проделаны и для SiAD диаметром 3мм.



**Рис. 4:** Временные свойства лавинного фотодиода в зависимости от приложенного смещения.

Было получено временное разрешение 550пс.

Следующий тест проводился с помощью светодиода. Короткий световой импульс (10нс) формировался светодиодом АЛ307 и передавался на фотодиод по оптическому кабелю. Свет излучался в диапазоне 610-780нм. Время нарастания светового импульса составляло около 100пс. Временное разрешение при такой постановке получилось 150 пс.

В дальнейшем было измерено временное разрешение  $\sigma$  и коэффициент усиления  $K_u$  в зависимости от приложенного к диоду напряжения. Результаты представлены на рис.4.

Наилучшее временное разрешение полученное при регистрации света 130пс, при регистрации электронов – 550пс.

**Разработка электромагнитных калориметров.** Электромагнитные калориметры являются неотъемлемой частью любого универсального спектрометра. Измерение энергии, выделяемой гамма квантом в веществе, является самым эффективным методом регистрации при высоких энергиях.

В качестве прототипа детектора большой площади для центрального спектрометра установки СФЕРА было собрано и испытано три свинцово-сцинтилляционных модуля электромагнитного калориметра. Каждый модуль собран из чередующихся 47 свинцовых и 47 сцинтилляционных пластин размером  $2 \times 70 \times 70\text{мм}^3$  и  $2 \times 70 \times 70\text{мм}^3$  соответственно (рис.5).

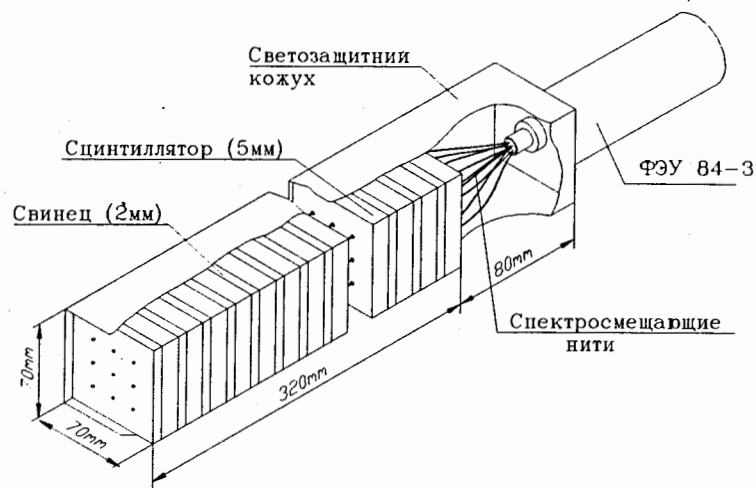


Рис. 5: Схематический вид модуля электромагнитного калориметра.

Общая толщина составляет 17,3 радиационных длин.

Калориметрические модули исследовались на пучках частиц разного сорта Сихрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ в широком диапазоне энергий. Измерения в области энергий от 0,5 до 1 ГэВ были выполнены на электронном пучке Харьковского физико-технического института.

Энергетическое разрешение калориметров было измерено на электронном пучке для центральной части модулей. График зависимости энергетического разрешения  $\sigma/\sqrt{E}$  от энергии регистрируемых электронов представлен на рис.6. Экспериментальные данные были аппроксимированы величиной:

$$\sigma/E = \frac{0,114 \pm 0,005}{\sqrt{E(\text{ГэВ})}} \quad (3)$$

Исследования показали хорошую линейную зависимость выходного сигнала от энергии детектируемых электронов. В рабочей области энергий от 0,5 до 2,25 ГэВ нелинейность характеристики не превышает 1,5%.

Используя данные сканирования электронами с энергией 2,25 ГэВ вдоль линии, соединяющей центры трех модулей, было проведено восстановление координат вершины электромагнитного ливня двумя способами: методом центра тяжести, используя координату центра каждого модуля  $x$

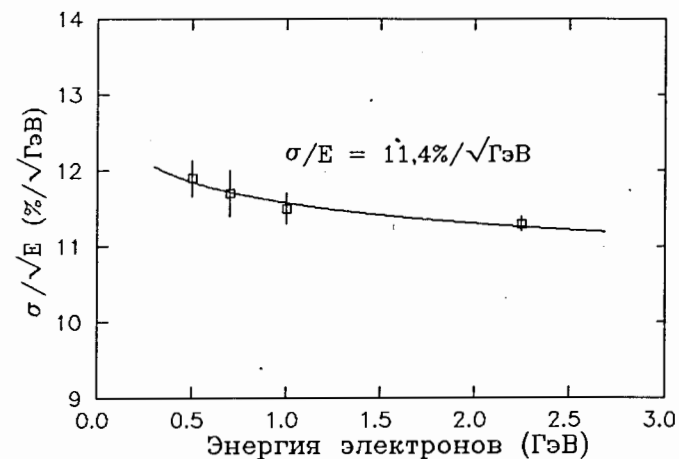


Рис. 6: Энергетическое разрешение для электронов с импульсом от 0,5 до 2,25 ГэВ/с.

и амплитуду сигнала в нем  $A$ :

$$x_c = \frac{\sum_i x_i A_i}{\sum_i A_i} \quad (4)$$

и модифицированным методом при фитировании профиля ливня двумя экспонентами:

$$E(x) = E_1 \exp(-|x - x_s|/\sigma_1) + E_2 \exp(-|x - x_s|/\sigma_2) \quad (5)$$

где  $x_s$  – координата ливня;

$E_1, E_2$  – коэффициенты пропорциональности;

$\sigma_1, \sigma_2$  – параметры экспонент.

В этом случае координата центра ливня определяется как:

$$x_c = x_m \pm \frac{b}{2} \mp \sigma_1 \text{Ln}[0,5(1 + A_v/A - m \pm 1)] \quad (6)$$

где  $x_m$  – координата модуля с наибольшей амплитудой;

$b$  – ширина модуля.

Знак в выражении (6) зависит от того какой модуль (слева или справа от центрального) берется в расчет.

На рис.7 представлены результаты обработки. Средние значения координаты ливня, рассчитанные по формуле (4), отмечены звездочками,

по формуле (6) - квадратиками. Параллельными штриховыми линиями отмечена захватываемая монитором область.

Для координаты, восстановленной методом (6), координатное разрешение было получено на уровне 4мм ( $\sigma_c = 3,9$  мм).

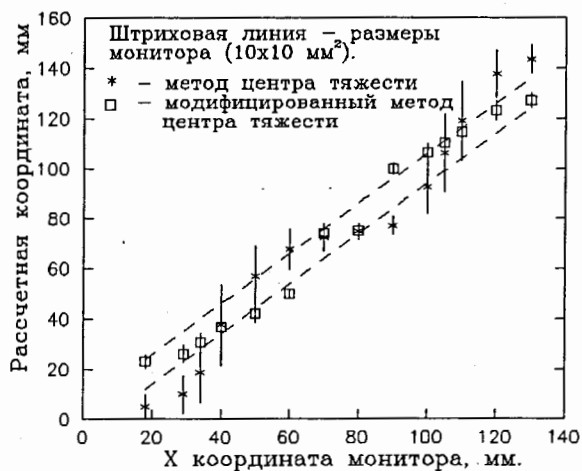


Рис. 7: Рассчитанное значение координаты ливня для электронов с импульсом 2,25 ГэВ/с.

Для устранения потери части электромагнитного ливня в местах стыковки модулей, была предложена безблочная конструкция электромагнитного калориметра. Было предложено использовать естественное затухание света внутри скintиллятора для локализации места прохождения частиц.

Для проверки метода был изготовлен экспериментальный модуль из 48 свинцовых и 48 скintилляционных пластин размером 1,5x147x147 и 5x147x147 мм соответственно. В пластинах было просверлено 49 отверстий диаметром 2 мм, расположенных в гексагональном порядке, в которые были пропущены спектросмещающие волокна диаметром 1,5 мм. Волокна были сгруппированы в 7 пучков по 7 штук и состыкованы с отдельным фотоэлектронным умножителем. Расстояние между ближайшими ФЭУ равно 50 мм. Суммарная толщина собранного пакета составила 13,4 радиационных длин.

Принцип работы такой системы состоит в следующем: выходной сигнал с ФЭУ зависит от количества света, переизлученного спектросмещающими нитями-шифторами, которое в свою очередь зависит от светового

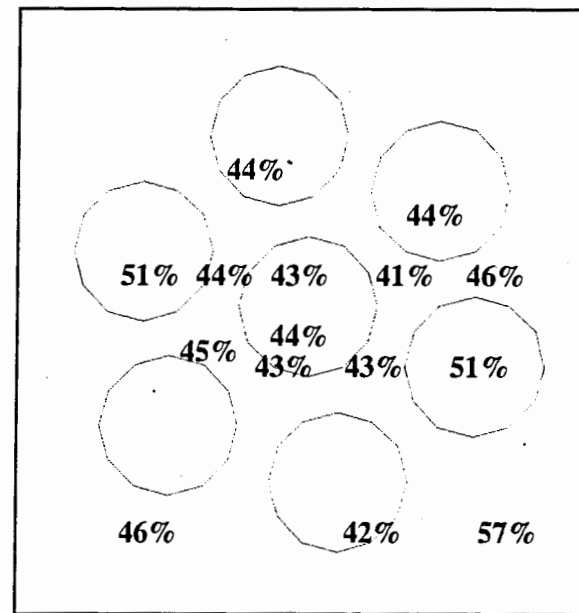


Рис. 8: Полученное амплитудное разрешение для различных точек.

потока в месте расположения шифтора. Используя тот факт что, свет, образовавшийся в результате прохождения заряженной частицы через скintиллятор, постепенно затухает вследствие различных факторов, можно по разности сигналов с ФЭУ определить место прохождения частицы. Это имеет особое значение при регистрации частиц, не инициирующих ливень в активном веществе детектора.

Созданный модуль исследовался на пучках дейтронов с импульсом 3 ГэВ/с и  $\alpha$ -частиц с импульсом 8 ГэВ/с. Были сняты данные для 15 различных точек в случае дейтронов и для двух — в случае  $\alpha$ -частиц. Место исследования задавалась положением скintилляционного монитора размером 10x10x3 мм. На рис.8 приведены полученные значения амплитудного разрешения для дейтронов. Усредненное по площади центральной области блока амплитудное разрешение равно  $43 \pm 1\%$ .

Координаты восстанавливались следующим образом:

$$x_c = \frac{\sum_i x_i A_i \exp^{-\frac{t_i}{\tau_0}}}{\sum_i A_i}, \quad y_c = \frac{\sum_i y_i A_i \exp^{-\frac{t_i}{\tau_0}}}{\sum_i A_i}, \quad (7)$$

где  $L_0$  – длина затухания света (в данном случае она равна 47 мм),

$x_i$  – координата  $i$ -го ФЭУ,

$A_i$  – сигнал с  $i$ -го ФЭУ.

Суммирование идет по ФЭУ, расположенным вдоль соответствующей оси.

$L_i$  – расстояние между  $i$ -м ФЭУ и предполагаемой координатой точки попадания частицы, вычисляемой обычным методом центра тяжести.

Использование естественного затухания света внутри сцинтиллятора позволяет с хорошей точностью определять координаты прошедшей сквозь него частицы.

При регистрации дейтронов и  $\alpha$ -частиц координатное разрешение (стандартное отклонение) составляет для точек из центральной области  $8 \pm 3$  мм, систематическая погрешность –  $8 \pm 4$  мм.

Среднее амплитудное разрешение для центральной области блока составило 43% для дейтронов с импульсом 3 ГэВ/с и 21% для  $\alpha$ -частиц с импульсом 8 ГэВ/с, прошедших без ядерного взаимодействия.

В процессе работ по исследованию различных вариантов построения калориметрической системы центрального детектора наше внимание привлекло новое сцинтиллирующее вещество  $BaF_2$ . Этот сцинтиллятор имеет великолепные характеристики как для регистрации нейтральных, так и заряженных частиц.  $BaF_2$  в настоящее время является одним из самых быстрых неорганических сцинтилляторов с временем высвечивания 0,6–0,8 нс.

Все выше перечисленные особенности  $BaF_2$  отвечают требованиям к элементам центрального детектора установки "СФЕРА". Для исследования параметров этого сцинтиллятора был изготовлен  $\delta E - E$  телескоп, с использованием толстого кристалла  $BaF_2$ . Использовался кристалл сечением  $3 \times 3$  см<sup>2</sup> и длиной 21,5 см.  $BaF_2$  был состыкован с входным кварцевым окном фотоэлектронного умножителя ФЭУ-140.

Исследования свойств кристалла большого размера проводились как с использованием радиоактивных гамма-источников, так и на пучках релятивистских ядер.

Световой выход кристалла измерялся с помощью различных радиоактивных источников. Суммарные данные приведены в таблице 1.

Величина затухания света в сцинтилляторе была измерена как с помощью радиоактивного гамма-источника  $^{137}Cs$ , так и в пучках релятивистских частиц. Результаты измерений показали прекрасную оптическую прозрачность кристалла. Затухание света по длине было невелико.

Гамма-источник	Энергия (КэВ)	Энергетическое разрешение (%)
$^{137}Cs$	662	12,7
$^{88}Y$	898	11,1
$^{60}Co$	1173	9,7
$^{60}Co$	1334	9,2
$^{88}Y$	1836	8,0
$^{228}Th$	2614	6,5
$^{241}Am+Be$	4440	5,5

Таблица 1: Результаты теста с гамма источником

Результаты измерений энергетического разрешения в пучках релятивистских частиц суммированы в таблице 2.

Частицы	Импульс (ГэВ/с)	Энергетическое разрешение (%)
Протоны	4,5	17,2
Дейтроны	4,5	18,5
Пионы	2,25	15,7

Таблица 2: Результаты теста на адронах

Амплитуда и энергетическое разрешение, также исследовались в зависимости от времени интегрирования сигнала. Было зафиксировано что улучшение характеристик заметно до времени интегрирования 300 нс. Дальнейшее его увеличение к существенному улучшению не приводит. Следовательно детекторы на основе  $BaF_2$  можно использовать в интенсивных потоках вторичных частиц  $> 10^6$ , без ухудшения их характеристик.

Во второй главе представлены результаты исследований фрагментации релятивистских дейтронов в кумулятивные пионы на созданной аппаратуре.

Важным итогом исследования кумулятивных процессов в Лаборатории высоких энергий стало введение понятия кварк-партонной структурной функции ядра и масштабной переменной кумулятивных процессов с массовыми поправками (кумулятивного числа  $X$ ), что позволило единым образом описать большой объем разнообразных данных по кумулятивным процессам. Процесс называется кумулятивным если  $X > 1$ . Аналитическое выражение для масштабной переменной получается из релятивистски



инвариантного уравнения для квадрата минимального 4-импульса частиц отдачи и для продуктов фрагментации пучка в лабораторной системе отсчета имеет вид:

$$X_I = \frac{E_1 m_0 + m_0^2 + (m_2^2 - m_1^2)/2}{E_0 m_0 - m_0^2 - (E_0 E_1 - p_0 p_1 \cos \Theta) - m_0 m_2} \quad (8)$$

$E_0$  и  $p_0$  полная энергия и импульс налетающего ядра на нуклон;  $E_1$ ,  $p_1$ ,  $m_1$  и  $\Theta$  - полная энергия, импульс, масса и угол рождения кумулятивной частицы.

**Исследование А-зависимости фрагментации дейтронов** Измерение А-зависимости фрагментации релятивистских дейтронов в кумулятивные  $\pi$ -мезоны на ядрах углерода, алюминия, меди и свинца проводилось на переднем спектрометре установки СФЕРА.

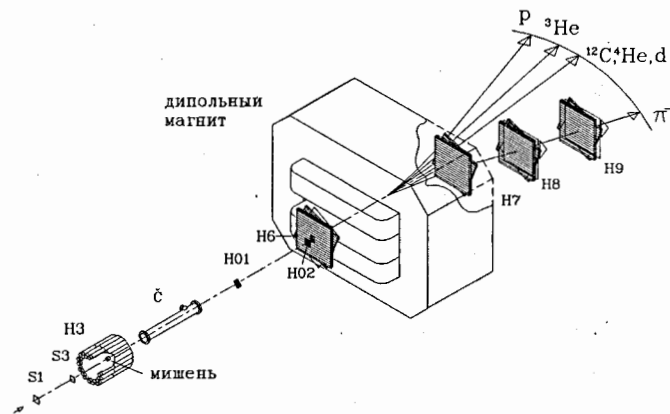


Рис. 9: Схема эксперимента по изучению рождения кумулятивных мезонов.

Были выполнены измерения фрагментации релятивистских дейтронов в  $\pi$ -мезоны вблизи  $0^\circ$  при значениях  $X \approx 1$ . В процессе реализации эксперимента спектрометр был откалиброван по импульсу регистрируемых частиц. Измерения проводились на пучке дейтронов с импульсом 4,5 А ГэВ/с и интенсивностью  $10^6$  в сек. Магнитный спектрометр включал в себя (рис.9):

- телескоп из трех сцинтилляционных счетчиков, мониторирующий первичный пучок;

- съемную мишень, расположенную в 700 см перед центром магнита;
- газовый пороговый черенковский счетчик высокого давления  $\check{C}1$ ;
- два годоскопа площадью  $16 \times 16 \text{ см}^2$ , состоящие из двух плоскостей, каждая из которых включает 16 счетчиков размерами  $400$  и  $230 \text{ см} \times 160 \times 9 \times 3 \text{ мм}^3$ ; они располагались на расстоянии  $400$  и  $230 \text{ см}$  от центра магнита;
- четыре трехкоординатных годоскопа площадью около  $1 \text{ м}^2$ , три из которых установлены сзади магнита на расстоянии  $200, 320, 520 \text{ см}$  от его центра, а один непосредственно перед магнитом;
- дипольный магнит с зазором между полюсами  $68 \text{ см}$ , шириной полюсов  $100 \text{ см}$  и длиной  $150 \text{ см}$ ; максимальная достижимая напряженность поля в центре магнита около  $0,82 \text{ Тесла}$ .

Угловой акцептанс спектрометра составлял около  $10^{-2}$  страд, импульсный - от  $2,5$  до  $6,0 \text{ ГэВ/с}$ . Это позволило охватить диапазон по  $X_I$  от  $0,5$  до  $2,0$  за одну экспозицию.

При импульсе дейтронного пучка  $8,9 \text{ ГэВ/с}$  за  $20$  часов работы было записано около  $19000$  событий на углеродной, алюминиевой, медной, свинцовой и "пустой" мишенях. Каждая мишень была облучена потоком  $1 \div 2 \cdot 10^9$  дейтронов. Толщина мишеней была выбрана  $5 \text{ г/см}^2$

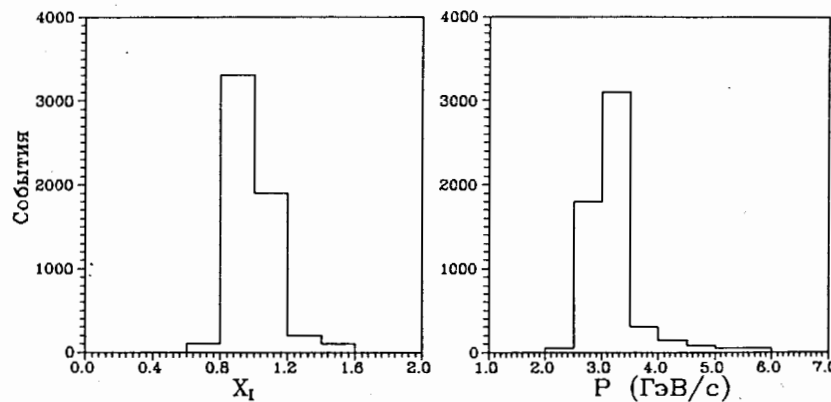


Рис. 10: Импульсный спектр и распределение по кумулятивному числу в эксперименте по изучению А-зависимости.

Суммарный импульсный спектр и распределение по кумулятивному числу обработанных событий представлены на рис.10. Как видно из рис.10 достаточную статистическую обеспеченность имеют соответствующие максимуму два интервала по кумулятивному числу. События в этих интервалах были просуммированы отдельно для каждой мишени и отнормированы на счет пучкового монитора. Затем из них был вычтен нормированный счет с "пустой" мишени и эти величины были нормированы на толщину мишени.

Результаты фитирования нормированного на  $A$  сечения зависимостью вида  $A^{\alpha-1}$  дали следующие значения  $\alpha$ :

$$\alpha = 0,22 \pm 0,1 \text{ для } 0,8 < X_I < 1,0$$

$$\alpha = 0,39 \pm 0,17 \text{ для } 1,0 < X_I < 1,2$$

В пределах полученных ошибок два значения параметра  $\alpha$  совпадают.

Усреднение для интервала  $0,8 < X_I < 1,2$  дает:  $\alpha = 0,27 \pm 0,09$ .

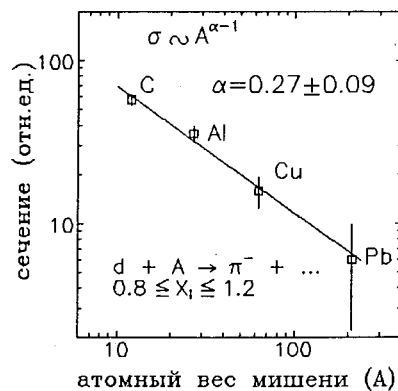


Рис. 11:  $A$ -зависимость сечения фрагментации кумулятивных пионов в интервале кумулятивных чисел  $0,8 < X_I < 1,2$ , нормированного на  $A$ .

Исследование множественности заряженных частиц, сопровождающих рождение кумулятивного  $\pi$ -мезона. Целью эксперимента являлось измерение фрагментации релятивистских дейтронов в кумулятивные пионы в узком угловом конусе по направлению налетающего ядра на различных ядрах мишени при одновременной регистрации ассоциированной зарядовой множественности от фрагментации ядер-мишени.

Эксперимент проводился на пучках дейтронов и ядер углерода с импульсом  $4,5 \text{ А ГэВ/с}$  с интенсивностью  $10^6$  ядер в секунду на Синхрофазотроне ОИЯИ. Магнитный спектрометр переднего направления установки СФЕРА был дополнен (рис.9) двухслойным цилиндрическим годоскопом НЗ. Он использовался для оценки неупругости реакции и позволял оценить полную и жесткую зарядовую множественность в угловом диапазоне от  $20^\circ$  до  $90^\circ$ . Внешний и внутренний слой годоскопа разделены стальным цилиндрическим поглотителем, подавляющим мягкую компоненту заряженной множественности до поперечных импульсов протонов  $P_T < 600 \text{ MeV/c}$ .

Полученные распределения по зарядовой множественности, сопровождающей фрагментацию дейтронов в кумулятивные пионы с  $X$  от  $0,8$  до  $1,2$  на ядрах углерода и свинца, представлены на рис.12. Распределения характеризуются средним значением  $\langle N_{ch} \rangle = 1,3$  и среднеквадратичным отклонением  $\sigma = 1,3$  для d-C соударений и  $\langle N_{ch} \rangle = 2,5$ ,  $\sigma = 2,2$  для d-Pb.

Доля событий, содержащих хотя бы одно совпадение в цилиндрическом годоскопе, интерпретируемое как трек заряженной частицы с импульсом  $p_T > 600 \text{ MeV/c}$ , не превышает  $15\%$  для углеродной мишени и  $16\%$  для свинцовой.

Таким образом, распределения по сопровождающей множественности и  $A$ -зависимости указывают, в основном, на периферический характер

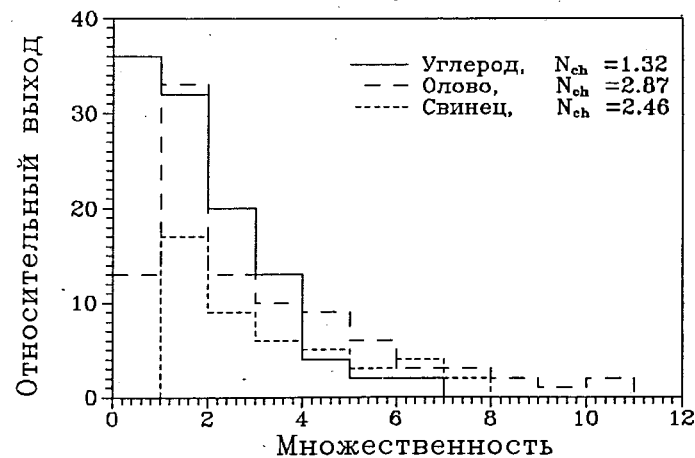


Рис. 12: Распределение по зарядовой множественности для фрагментации дейтронов на мишенях из углерода, олова и свинца.

взаимодействия, приводящего к образованию кумулятивного пиона. Следует подчеркнуть, что в такой постановке эксперимента пион практически не имеет поперечного импульса.

В третьей главе описан эксперимент по исследованию выхода на асимптотический режим сечений рождения протонов под углом  $103^\circ$  в дейтрон-ядерных взаимодействиях на внутренней мишени Нуклотрона (рис.13).

В основу исследований был положен тот факт, что одночастичные инвариантные инклюзивные спектры сечений имеют экспоненциальный характер. Причем такая зависимость наблюдается вплоть до кинематический границы. Спектры хорошо аппроксимируются выражением

$$E d^3\sigma/dp^3 = A \exp(-T/T_0) \quad (9)$$

где  $T$  - кинетическая энергия регистрируемых частиц,  $T_0$  - параметр.

Целью исследований было измерение поведения  $T_0$  с ростом энергии первичной частицы.

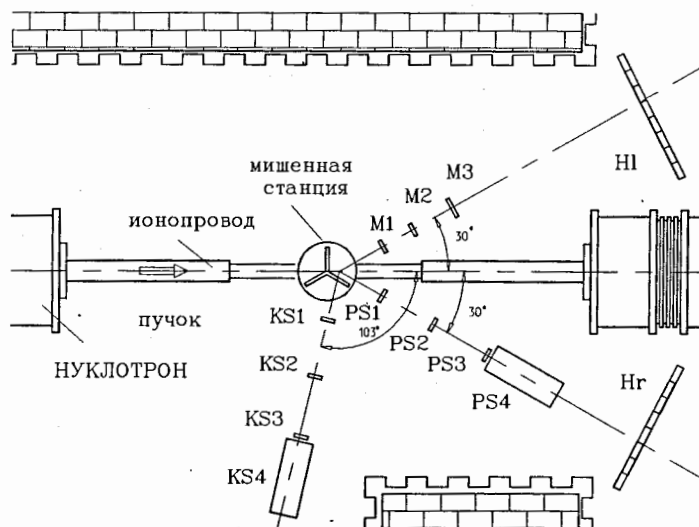


Рис. 13: Схема экспериментальной установки.

**Описание эксперимента.** Для проведения необходимых измерений был выбран хорошо зарекомендовавший себя в различных экспериментах метод регистрации и сепарации вторичных частиц по времени пролета ( $\Delta T$ ) на заданной базе ( $L$ ) и энергетическим потерям в тонком слое вещества ( $\Delta E$ ) и в детекторе большой толщины ( $E$ ). Схема эксперимента, реализованного на внутренней мишени Нуклотрона представлена на рис.13. Аппаратура размещалась в тоннеле ускорителя в районе линейного промежутка. Основу установки составляли два идентичных плеча К-плечо и Р-плечо. Оба плеча располагались с внешней стороны кольца ускорителя Р-под углом  $30^\circ$ , К-под углом  $103^\circ$ . Каждое плечо содержит 4 сцинтилляционных счетчика S1, S2, S3 и S4 размером  $20 \times 20 \times 5 \text{ мм}^3$ ,  $30 \times 30 \times 5 \text{ мм}^3$ ,  $40 \times 40 \times 5 \text{ мм}^3$  и  $75 \times 75 \times 650 \text{ мм}^3$  соответственно. Первый счетчик S1 располагался в  $\approx 40$  см от мишени, а за ним в 50 см S2, в 100 см - S3 и в 105 см - S4.

Все детекторы прошли предварительную коллировку и тестирование на пучках дейтронов с импульсом 6 ГэВ/с. Полностью все характеристики представлены в таблице 3.

Детектор	амплитудное разрешение	временное разрешение (нс)
PS1		$160 \pm 5$
PS2	$25\% \pm 2\%$	$350 \pm 5$
PS3	$30\% \pm 2\%$	$270 \pm 5$
PS4	$15\% \pm 2\%$	
KS1		$170 \pm 10$
KS2	$20\% \pm 4\%$	$320 \pm 10$
KS3	$29\% \pm 4\%$	$220 \pm 10$
KS4	$17\% \pm 4\%$	

Таблица 3: Параметры детекторов. Здесь буквы К или Р означают принадлежность счетчиков к К или Р-плечу.

В процессе набора статистики имелась возможность работать с тремя мишенями. В нашем распоряжении находились: полиэтиленовая толщиной  $1,57 \text{ мкм}$ , медная толщиной  $0,55 \text{ мкм}$  и золотая толщиной  $1,72 \text{ мкм}$  мишени.

**Процедура отбора событий.** Для каждой регистрируемой частицы запоминались несколько величин: время пролета на двух базах и энер-

говьделение в двух детекторах. В результате эксперимента получался набор двумерных распределений по этим величинам. Анализ этих распределений позволяет провести идентификацию частицы и определить ее параметры.

**Анализ результатов.** Набор статистики в эксперименте проводился с двумя мишенями: полиэтиленовой (1,57μм) и золотой (1,72μм). Ввод мишени в пучок осуществлялся при постоянном магнитном поле в ускорителе. Это позволило добиться однородности взаимодействия во времени. Экспозиция проводилась при трех значениях поля 4кГс, 6кГс и 8,4кГс, соответствующих кинетической энергии дейтронов 0,7, 1,3 и 2,0 Гэв/нуклон.

Наиболее полно при всех трех энергиях измерение было выполнено на полиэтиленовой мишени. При интенсивности первичного пучка  $\approx 10^9$  частиц/сек скорость набора информации доходила до  $2 \times 10^4$  событий за цикл, что позволило записать  $\approx 10^5$  полезных событий для каждой энергии.

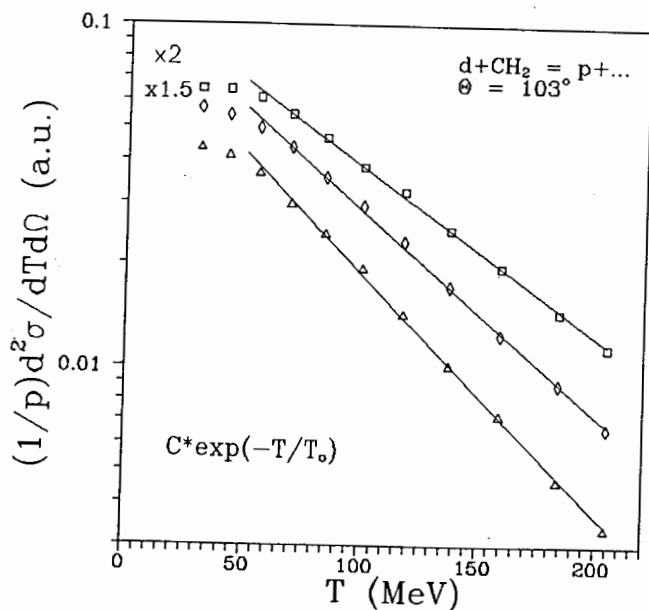


Рис. 14: Энергетические спектры вторичных протонов.

Анализ проводился для частиц (в основном протонов), восстановленная масса которых удовлетворяет условию  $600\text{МэВ} < M < 1300\text{МэВ}$ . Доля частиц другого сорта невелика и составляет менее 1%. Надежная идентификация вторичных частиц в реакции  $d+C \rightarrow p+\dots$  дала возможность провести измерение дифференциальных энергетических спектров протонов. Весь протонный спектр разбивался на девять интервалов, внутри которых проводилось суммирование.

В окончательном релятивистски-инвариантном виде данные представлены на рис.14. Ввиду незначительности абсолютного значения сечения для определения параметра наклона  $T_0$ , экспериментальные данные на рис.14 показаны безотносительно к абсолютным сечениям.

В энергетическом интервале  $50 < E_p < 220\text{МэВ}$  полученные значения сечений фитировались выражением (9). Величина параметра наклона  $T_0$  просуммирована в таблице 4. Ошибки приведены только статистические.

$E_{\text{кин}}$ (ГэВ)	$T_0$ (МэВ)	$\chi^2$
0,7	$33,1 \pm 3$	2,3
1,3	$38,9 \pm 3$	3,2
2,0	$46,9 \pm 2$	1,6

Таблица 4: Параметр наклона.

Полученные в данном эксперименте результаты хорошо согласуются с литературными данными по  $p+C \rightarrow p+\dots$  взаимодействию.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертации, которые состоят в следующем:

1. Создана современная детектирующая аппаратура первой очереди установки СФЕРА:

- вершинный четырех-плоскостной сцинтилляционный годоскоп размером  $16 \times 16 \text{ см}^2$ , позволяющий работать в высокоинтенсивных пучках заряженных частиц (до  $2 \times 10^7$  частиц в секунду на элемент детектора);
- время-пролетная система, основу которой составляет 22-элементный сцинтилляционный годоскоп размером  $2 \times 2 \text{ м}^2$ , позволяющий проводить как временной, так и амплитудный анализ. Для всей системы

удалось достичь высокого ( $400 \text{ пс} \pm 80 \text{ пс}$ ) временного и амплитудного разрешения ( $32\% \pm 2\%$ ). В целом вся система имеет высокую степень однородности характеристик (на уровне 2%).

## 2. Разработаны детекторы центрального спектрометра установки СФЕРА.

- Исследованы временные параметры лавинных фотодиодов в условиях как для регистрации светового излучения, так и для регистрации электронов. При регистрации светового излучения удалось достичь временного разрешения на уровне 130 пс.
- Проведены исследования прототипа электромагнитного калориметра типа "сандвич" с волоконно-оптическим съемом света. Получено хорошее энергетическое  $\sigma/E = 0,114/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$  и координатное разрешение  $\sigma_c = 3,9 \text{ мм}$ .
- Предложен и испытан способ регистрации адронов в электромагнитном калориметре типа "сандвич" с высоким координатным разрешением, получено координатное разрешение  $\sigma_c = 8 \text{ мм}$  и амплитудное разрешение 43% для дейтронов и 21% для  $\alpha$ -частиц с импульсом 3 ГэВ/с и 8 ГэВ/с соответственно.
- Испытан калориметрический модуль на основе кристалла  $\text{BaF}_2$ . Показана возможность применения таких детекторов в условиях высокоинтенсивных потоков вторичных частиц.

## 3. Разработан и создан двухплечевой сцинтилляционный спектрометр для обеспечения первых экспериментов на внутреннем пучке нового сверхпроводящего ускорителя Нуклотрона.

## 4. С помощью созданной аппаратуры получены следующие экспериментальные данные о взаимодействии релятивистских ядер с импульсом 4,5 ГэВ на нуклон:

- измерен показатель степени  $\alpha$  в  $A^\alpha$ -зависимости сечения фрагментации релятивистских дейтронов в кумулятивные  $\pi^-$ -мезоны на ядрах углерода, алюминия, меди и свинца. Для пионов с кумулятивным числом в интервале  $0,8 < X_I < 1,2$  получено значение  $\alpha = 0,27 \pm 0,09$ ;
- получены экспериментальные данные о поведении спектров быстрых кумулятивных  $\pi^-$ -мезонов в зависимости от множественности сопровождающих заряженных частиц, фрагментирующих из ядрамишени;

## 5. На новом сверхпроводящем ускорителе ЛВЭ Нуклотроне получены экспериментальные данные о дейтрон-ядерных взаимодействиях при вариации кинетической энергии первичных дейтронов от 0,7 до 2,0 ГэВ на нуклон.

### Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Ю.С.Анисимов, С.В.Афанасьев, В.К.Бондарев и др.  
Сцинтилляционный передний спектрометр установки СФЕРА.  
Краткие сообщения ОИЯИ, No 5-91, Дубна, 1991, с.23.
2. С.В.Афанасьев.  
Время-пролетная система большой площади.  
Препринт ОИЯИ, P13-95-101, Дубна, 1995,
3. S.V.Afanasyev, Yu.Anisimov, Yu.Gotra, et al.,  
MRS Silicon avalanche detectors with negative feedback for time-of-flight systems.  
Nuclear Physics B, B44 (1995) p.402.
4. С.В.Афанасьев, В.А.Гладышев, А.Е.Зацеркляный, и др.,  
Электромагнитный калориметр с волоконно-оптическим съемом света.  
ПТЭ, N5, 1992, с.63-70.
5. С.В.Афанасьев, Е.В.Игорова, В.И.Колесников, и др.,  
Электромагнитный калориметрический модуль с улучшенным координатным разрешением.  
Препринт ОИЯИ, P13-95-431, Дубна, 1995,
6. P.Kozma, S.V.Afanasyev, A.I.Malakhov, et al.,  
Test of Large  $\text{BaF}_2$  crystals in beams of relativistic particles.  
Nucl. Instr. and Meth., A314 (1992), p.26-30.
7. S.V.Afanasyev, Yu.S.Anisimov, V.V.Arkhypov, et al.,  
Target Dependence of Relativistic Deuteron Fragmentation into Cumulative Pions.  
Physica Scripta, Vol.48, 1993, p.124.
8. S.V.Afanasyev, Yu.S.Anisimov, V.V.Arkhypov, et al.,  
Study of Charge Multiplicity in Cumulative Pion Production. JINR  
Rapid Communications, No.1-93, Dubna, 1993, p.21.

9. S.V.Afanasiev, Yu.S.Anisimov, V.V.Arhipov, et al.,  
Experimental Study of Multiplicity Dependence of Cumulative Pion Production in Fragmentation of Relativistic Deuterons and Carbon Nuclei.  
JINR Rapid Communications, No.3-93, Dubna, 1993, p.40.
10. S.V.Afanasiev, M.V.Altaisky, Yu.G.Zhestkov  
On the Application of wavelet Analysis to Separation of Secondary Particles from Nucleus-Nucleus Interaction.  
Il Nuovo Cimento, Vol. 108A, N.8. 1995, p.919-927
11. A.M.Baldin, S.V.Afanasiev, Yu.S.Anisimov, et al.  
The first experiments on nuclear reaction studies at nuclotron.  
JINR Rapid Communications, No.4[61]-93, Dubna, 1993, p.13.
12. A.M.Baldin, Kh.U.Abraamyan, S.V.Afanasiev, et al.  
An experimental run on the new superconducting accelerator Nuklotron at 3.8 and 6.2 GeV/c deuteron momentum.  
Nuclear Physics A, A583 (1995) p.637

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 июня 1996 года.