

К 438

13-89-660

КИРЮШИН
Юрий Тихонович

УДК 539.1.07

СПЕКТРОМЕТР БОЛЬШОЙ СВЕТИМОСТИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГЛУБОКОНЕУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЮОНОВ

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Общепитутском научно-методическом отделении Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

ГОЛУТВИН
Игорь Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

ДОЛГОШЕИН
Борис Анатольевич

доктор физико-математических наук,
профессор

НИКИТИН
Владимир Алексеевич

Будущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий,

Протвино

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 198 г.
в _____ часов на заседании Специализированного Совета
Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института
ядерных исследований, г.Дубна, Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 198 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета

М.Ф. ЛИХАЧЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. Классические опыты группы СЛАК-МТИ^{М/} по инклюзивному рассеянию электронов оказали фундаментальное влияние на понимание структуры нуклонов. Дальнейшее продвижение в исследовании глубоконеупругого рассеяния лептонов в область больших значений квадрата переданного четырехимпульса тормозилось, с одной стороны, отсутствием электронных ускорителей больших энергий, а с другой стороны - малыми сечениями при больших величинах квадрата переданного четырехимпульса. Запуск в ЦЕРН 400-ГэВного протонного ускорителя и создание на нем высокоинтенсивного мюонного пучка обеспечили условия для исследования структуры нуклонов на значительно меньших расстояниях. В этих экспериментах, измеряя энергию и угол рассеянного мюона, можно изучать взаимодействие виртуального фотона с заряженными конститuentами нуклона в зависимости от энергии, массы и поляризации фотона. Характеристики слабого взаимодействия можно изучать, измеряя интерференцию между пропагатором фотона и нейтральным током^{МН/}.

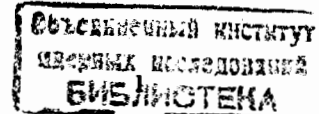
Ввиду важности этих экспериментов, исследования глубоконеупругого взаимодействия мюонов высоких энергий (эксперимент МА-4) были включены в программу первоочередных экспериментов на 400-ГэВном протонном ускорителе ЦЕРН и были направлены, в основном, на прецизионное изучение поведения структурных функций нуклонов, изучение ядерных эффектов в структурных функциях, а также на изучение Р-нечетных эффектов при максимально возможных энергии и переданном четырехимпульсе в недоступной ранее области кинематических переменных. Эта проблематика была актуальной на протяжении последних десятилетий и далее будет находиться в центре внимания в связи с созданием нового поколения протонных ускорителей ТэВного диапазона.

Цель работы - разработка и создание экспериментальной установки и обеспечение получения на ней экспериментальных данных для широкой программы исследований глубоконеупругого взаимодействия мюонов высоких энергий на 400-ГэВном протонном ускорителе ЦЕРН.

Научная новизна. Для проведения опытов в интенсивных пучках мюонов высоких энергий создана экспериментальная установка нового типа - спектрометр большой охватности, отличительной особенностью которой является использование протяженной мишени (в том числе жидководородной и жидкодейтериевой) и распределенной модульной структуры де-

^{М/} R.E.Taylor, in Proc. 1975 Int.Conf.on Lepton and photon interactions at high energies, SLAC, Stanford (1975), p.679

^{МН/} J.M.Bilenky and J.T.Petrov, JINR E2-10809 (1977).



тектирующих систем, предложены и реализованы принципы создания распределенного координатного детектора рассеянных мюонов на основе проволочных пропорциональных камер. При этом был найден ряд новых методических и технических решений:

- предложен новый тип конструкции большой проволочной пропорциональной камеры на основе панелей с сотовым наполнением, имеющей малое количество вещества по пучку;

- предложен новый тип конструкции трехкоординатной пропорциональной камеры, имеющей пониженную эффективность в районе пучка и высокую эффективность в остальной области;

- разработана технология массового изготовления больших проволочных камер, отличительной особенностью которой является непрерывный контроль всех операций в процессе изготовления, обеспечивающий высокую идентичность характеристик камер;

- предложена и реализована методика исследования характеристик пропорциональных камер без пучка с помощью радиоактивного источника и создана соответствующая аппаратура;

- разработан многоуровневый триггер экспериментальной установки с распределенной логикой с использованием информации с пропорциональных камер и сцинтилляционных счетчиков, найдены способы, позволившие сократить время на его выработку, решены проблемы быстрой смены условий триггера в процессе набора данных;

- в процессе запуска и эксплуатации экспериментальной установки разработана методика контроля эффективности камер, обеспечившая высокую стабильность (лучше 0,2%) эффективности регистрации частиц в течение длительных сеансов набора экспериментальных данных.

Практическая ценность.

I. Разработана, создана и запущена на пучке экспериментальная установка, обеспечена её стабильная работа и высокое качество экспериментальной информации при выполнении широкой программы исследований глубокоэластичного рассеяния мюонов на различных мишенях. Экспериментальная установка проработала на мюонном пучке СПС ЦЕРН с 1978 по 1985 год, на ней было зарегистрировано рекордное на то время число (100 млн.) глубокоэластичных взаимодействий мюонов на ядрах различных мишеней. На основе этого материала:

- измерены с высокой точностью ($\sim 3\%$) структурные функции $F_2(x, Q^2)$ нуклона в ядрах водорода, дейтерия, углерода, выполнен физический анализ структурных функций и определено значение масштабного параметра КХД-теории $- \Lambda$;
- впервые обнаружена во взаимодействии поляризованных мюонов с нуклонами интерференция слабого и электромагнитного взаимодействия;
- измерены ядерные эффекты в структурных функциях нуклонов.

2. Создана специальная научно-методическая база, включающая комплекс технологической оснастки для изготовления камер и оборудования для испытаний, которая в дальнейшем послужила основой для создания других крупных экспериментальных установок.

На защиту выносятся следующие положения и результаты.

1. Разработка и создание экспериментальной установки для исследования глубокоэластичного взаимодействия мюонов высоких энергий.

2. Разработка и исследование распределенного координатного детектора рассеянных мюонов на основе проволочных пропорциональных камер.

3. Разработка конструкции и технологии изготовления проволочных пропорциональных камер на основе панелей с сотовым наполнением, имеющих малое количество вещества по пучку, исследование их характеристик.

4. Разработка и создание научно-методической базы, включающей комплекс технологической оснастки для изготовления проволочных камер и оборудование для их испытаний.

5. Разработка методики исследования характеристик проволочных камер с помощью радиоактивного источника и её применение для исследования характеристик эксперимента МА-4.

6. Разработка методики исследования характеристик детекторов на пучке мюонов и применение их для исследования характеристик в реальных условиях проведения эксперимента с целью обеспечения высокой стабильности характеристик установки в течение длительных сеансов набора экспериментальных данных.

7. Предложение и реализация развития экспериментальной установки, позволившего расширить область кинематических переменных в сторону малых x и Q^2 ($x \geq 0,05; Q^2 \geq 8 \text{ ГэВ}^2$).

8. Разработка и создание трехкоординатных пропорциональных камер с пониженной эффективностью в районе пучка и высокой эффективностью в остальной области.

9. Разработка и реализация многоуровневого триггера установки с распределенной логикой с использованием информации с пропорциональных камер и сцинтилляционных счетчиков.

Апробация работ. Материалы, представленные в диссертации, докладывались на научных семинарах ОИЯИ и ЦЕРН, на заседаниях Ученого Совета ОИЯИ, а также ежегодно с 1979 года на многих Международных конференциях и совещаниях, в том числе на Международных конференциях по физике высоких энергий, Международных конференциях Европейского физического общества по физике высоких энергий, Международных симпозиумах по лептонным и фотонным взаимодействиям при высоких энергиях, Международных конференциях по нейтринной физике и астрофизике.

Структура диссертации отвечает избранной теме и содержанию. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и библиографического списка литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении кратко излагается актуальность исследования глубоко-неупругого рассеяния заряженных лептонов на нуклонах, которое является одним из основных методов экспериментального изучения структуры нуклонов.

Основу его составили известные эксперименты по неупругому рассеянию электронов на протонах и дейтронах, проведённые в СЛАК, США в 1967-1975 годах при квадратах переданных четырёхимпульсов вплоть до 20 ГэВ². Дальнейшее продвижение в изучении структуры нуклонов стало возможным после создания во ФНАЛ, США и в ЦЕРН, Швейцария высокоинтенсивных мюонных пучков. Изучение глубоконеупругого рассеяния мюонов на нуклонах вплоть до максимально достижимых значений квадрата переданного четырёхимпульса вошло в программу первоочередных экспериментов на ускорителе СПС в ЦЕРН, Швейцария. Для реализации научной программы были созданы две установки, одна из которых - спектрометр большой светимости, хорошо известный под названием NA-4, где буквы обозначают северный экспериментальный павильон (North Area) - место расположения экспериментальной установки, а цифра - порядковый номер. Потери на излучение у мюонов в 10⁴ раз меньше, чем у электронов, поэтому для получения большой светимости в экспериментах с мюонами можно использовать протяжённые мишени, что и воплощено в установке NA-4. Высокая и однородная эффективность регистрации мюонов во всём кинематическом диапазоне позволили на этой установке расширить границу изучаемых Q² вплоть до 280 ГэВ² и обеспечить на сегодня наилучшую точность экспериментальных данных.

В первой главе диссертации в кратком виде излагается кинематика процесса глубоконеупругого взаимодействия мюона с нуклоном, описываемого реакцией



Первичный мюон с энергией E₀ и импульсом P₀, взаимодействуя с нуклоном, излучает виртуальный фотон γ с импульсом q, отклоняется на угол рассеяния θ_M и превращается во вторичный (рассеянный) мюон с энергией E_M и импульсом P_M. Нуклон поглощает виртуальный фотон γ, излучая адроны. Измерив E_M, P_M и θ_M, можно определить все параметры взаимодействия. Основные из них:

- P_T - поперечный импульс рассеянного мюона

$$P_T = P_M \cdot \sin \theta_M \quad (2)$$

-Q² = -q² - квадрат переданного четырёхимпульса

$$Q^2 = 2E_0 E_M (1 - \cos \theta_M) = 4E_0 E_M \cdot \sin^2 \theta_M / 2 \quad (3)$$

$$Q_{\max}^2 = 2M_p E_0 \quad (4)$$

где : M_p - масса протона

$$\nu = E_0 - E_M \quad (5)$$

полная энергия адронов, образовавшихся в результате глубоконеупругого взаимодействия.

x - безразмерная скейлинговая переменная, заключённая в пределах 0 ≤ x ≤ 1

$$x = \frac{Q^2}{2M_p \nu} \quad (6)$$

y - безразмерная скейлинговая переменная, заключённая в пределах 0 ≤ y ≤ 1

$$y = (E_0 - E_M) / E_0 = \nu / E_0 \quad (7)$$

Дважды дифференциальное сечение глубоконеупругого взаимодействия мюона с нуклоном для однофотонного обмена записывается в виде ^{жж} /:

$$\frac{d^2 \sigma}{dQ^2 dx} = \frac{4\pi \alpha^2}{Q^4 x} \cdot \left[1 - \gamma - \frac{Q^2}{4E_0^2} + \frac{y^2 E_0^2 + Q^2}{2E_0^2 [R(x, Q^2) + 1]} \right] F_2(x, Q^2) \quad (8)$$

где α - постоянная тонкой структуры,

F₂(x, Q²) и R(Q², x) - безразмерные структурные функции, содержащие информацию о структуре нуклона.

Функция R(Q², x) = σ_L/σ_T есть отношение полного сечения поглощения фотонов с продольной поляризацией к полному сечению поглощения фотонов с поперечной поляризацией. Из выражения (8) следует, что сечение глубоконеупругого взаимодействия изменяется в зависимости от переданного импульса как 1/Q⁴, поэтому для прецизионного измерения структурных функций в области больших Q² необходима установка с большой светимостью. Сечение глубоконеупругого взаимодействия мюонов, измеренное в эксперименте, необходимо корректировать функцией радиационных поправок r(Q², x), чтобы выделить долю сечения, обусловленную однофотонным обменом. Полученная величина сечения была использована для извлечения структурных функций F₂(Q², x) и R(Q², x).

Функция радиационных поправок r(Q², x) для тороидального спектрометра считалась по программе, предложенной в работе ^{жж} /.

Для проведения исследований структуры нуклонов в экспериментах по глубоконеупругому рассеянию мюонов требуется интенсивный мюонный пучок, удовлетворяющий самым высоким требованиям. Такой пучок был создан на ускорителе СПС ЦЕРН.

^{жж} / A. Buras, Rev. Mod. Phys., 1980, 52, No 1, p. 199

^{жж} / D. Yu. Bardin and N. M. Shumeiko, Sov. J. Nucl. Phys. 29(1979) 499.

Основные характеристики его приведены в таблице I.

1. Энергия E_0 (в пределах)	- 50 + 300 ГэВ
2. Интенсивность при $E_0 = 280$ ГэВ	- $\geq 2 \cdot 10^7$ мюонов/сброс
3. Разброс частиц по импульсу $\frac{\Delta P}{P}$	- $\pm 4\%$
4. Точность измерения импульса отдельной частицы	- $\pm 0,5\%$
5. Примесь адронов	- $\leq 10^{-6}$
6. Размеры в зоне установки	- $b_x \approx b_y = 2$ см
7. Расходимость в зоне установки по:	
горизонтали	- 0,3 мрад
вертикали	- 0,6 мрад

Гало пучка на входе в спектрометр имело две главные составляющие фронтальную (по величине примерно 10% от интенсивности пучка) и попутную снизу из-под земли (по величине примерно 1%), рождающаяся в области адронного поглотителя.

Мюоны пучка рождались в процессе двухчастичных распадов π -мезонов и K-мезонов и имели продольную поляризацию, величина которой определялась отношением энергий мюона и родительской частицы, как представлено на рис. I.

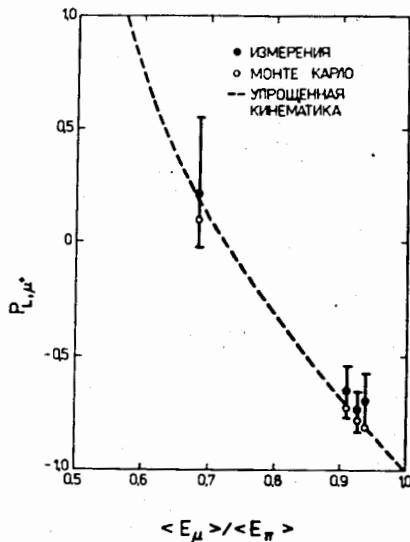


Рис. I. Продольная поляризация мюонов пучка в зависимости от отношения энергий мюона и пиона.

Поляризация мюонов учитывалась при настройке пучка для проведения измерений, чувствительных к поляризации.

Вторая глава диссертации посвящена общим вопросам разработки и создания спектрометра большой светимости. В основу его положен новый методический принцип, заключающийся в том, что установка состоит из длинного тороидального магнита с отверстием в центральной части, где расположена мишень (водород, дейтерий, углерод). Торойд намагничен до насыщения, и магнитное поле B_0 имеется только внутри сердечника. Образующиеся в результате глубоконеупругого взаимодействия мюонов с ядрами мишени частицы выходят из неё и поглощаются в магните, а "выживают" только мюоны. Принцип работы тороидального спектрометра можно пояснить с помощью рис.2.

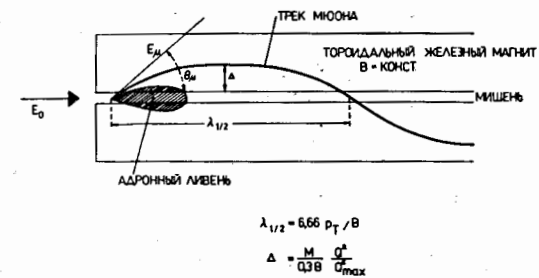


Рис. 2. Физический принцип спектрометра.

Поскольку поле в тороидальном магните направлено по кругу и перпендикулярно к направлению движения рассеянного мюона, последний отклоняется к центру магнита, пересекает его, отклоняется обратно и совершает, таким образом, осцилляции по длине магнита, оставаясь внутри него. При этом траектория мюона представляет собой части окружности и характеризуется двумя параметрами: амплитудой колебаний Δ и длиной полу волны $\lambda_{1/2}$, которые связаны с кинематическими переменными глубоконеупругого рассеяния мюонов простыми соотношениями:

$$\Delta = \frac{M_p}{0,3B} \cdot \frac{q^2}{q_{max}^2} = \frac{M_p}{0,3B} \cdot x \cdot y \quad (9)$$

$$\Delta_{max} = \frac{M_p}{0,3B} \quad (10)$$

$$\lambda_{1/2} = \frac{2P_T}{0,3B} \quad (11)$$

Таким образом, измерив параметры траектории мюона, можно определить кинематические переменные глубоконеупругого рассеяния мюонов на нуклонах.

Торoidalный спектрометр имеет ряд важных свойств:

- геометрическая эффективность захвата рассеянных мюонов внутри магнита приближается к 100%;
- радиальное смещение рассеянного мюона не зависит от первичной энергии пучка, а определяется только скейлинговыми переменными;
- зависимость радиального смещения рассеянного мюона от отношения Q^2/Q_{max}^2 позволяет просто решить задачу отбора событий по Q^2 , используя для этой цели кольцевые триггерные счётчики;
- азимутальная симметрия сильно уменьшает зависимость измерений сечения взаимодействия от изменений в фазовом пространстве пучков, неизбежно возникающих при изменении знака заряда пучка, энергии, поляризации.

Схема экспериментальной установки, построенной на этом принципе, приведена на рис. 3. Спектрометр состоит из десяти идентичных

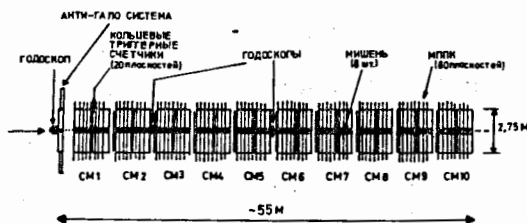


Рис. 3. Схема расположения экспериментальной установки на пучке мюонов.

цилиндрических супермодулей SM1 + SM10, каждый из которых имеет длину 5,25 м и наружный диаметр 2,75 м. Вдоль оси супермодуль имеет отверстие диаметром 0,5 м, куда вставляются внутренняя обмотка и мишень (водород, дейтерий и др.). Супермодули отделены друг от друга свободными промежутками, достаточными для размещения устройств для

заполнения мишеней и замыкания обмоток магнита. В состав каждого супермодуля входят:

- отдельная мишень;
- отдельный магнит со своими обмотками;
- 8 плоскостей пропорциональных камер, измеряющих поочередно X и координаты траектории мюона;
- 2 плоскости кольцевых триггерных счётчиков, обеспечивающих регистрацию мюонов внутри магнита.

В состав спектрометра входят 3 пучковых годоскопа мозаичной структуры, которые обеспечивают мониторинг пучка и позволяют восстановить начальную траекторию мюона, рассеянного на мишени и давшего запуск установкам, для последующего определения его импульса с помощью 4 годоскопов станции измерения импульса пучка.

Спереди установка защищена от гало пучка запрещающей системой из сцинтилляционных счётчиков общей площадью ~22 м².

Отдельный магнит супермодуля состоит из 8 модулей сердечника, изготовленных из 32 пластин низкоуглеродистой стали толщиной 11 см. Постоянный ток 2500 А течёт по обмоткам параллельно оси, создавая в сердечнике круговое поле индукцией В на внутреннем радиусе 2,11 тл, на внешнем 1,77 тл. Обратный ток течёт по внешней обмотке, удалённой на достаточное расстояние от сердечника, чтобы не оказывать влияния на магнитное поле.

Размеры магнита и величина поля В определяют предельный импульс Q^2 , ниже которого все рассеянные мюоны удерживаются внутри железа. $Q^2_{пр} = 0,60 V_{эф} (R_{внеш} - R_{внут}) E_0$, где $V_{эф}$ - эффективное поле, полученное умножением $V_{ср}$ на фактор 0,7 для учёта воздушных промежутков в сердечнике магнита. При энергии пучка $E_0 = 280$ ГэВ $Q^2_{пр} = 240$ ГэВ². Траектории мюонов с $Q^2 > Q^2_{пр}$ не теряются, поскольку их длины вполне достаточно, чтобы определить кинематические переменные вплоть до Q^2_{max} . Имеются ограничения на Q^2 снизу. Одно - неуправляемое, обусловлено наличием центрального отверстия магнита, другое - управляемое, обеспечивается отключением соответствующих колец триггерных счётчиков.

Полная длина спектрометра составляет примерно 50 м. Сокращение длины установки означает обрезание событий по поперечному импульсу p_T . При величине $p_T = 10$ ГэВ/с и той же индукции $V_{эф} = 0,7 V_{ср}$ $\lambda_{1/2} = 50$ м. Таким образом, длина спектрометра является определяющим параметром не только с точки зрения увеличения светимости установки, но и с точки зрения регистрации всех интересных событий глубоконеупругого взаимодействия мюонов.

Третья глава диссертации посвящена вопросам разработки отдельных элементов установки. При выборе координатного детектора учитыва-

лись:

а) фоновая загрузка.

Её можно оценить, считая, что гало пучка мюонов равномерно распределено по всей поверхности и составляет 10% от полной интенсивности пучка. При интенсивности 10^8 мюонов полная загрузка детектора составит 10^7 I/сек и приведёт к регистрации случайных событий в 100% случаев при длительности стробирующего сигнала 100 нс. Учитывая, что площадь детектора составляет 9 м^2 , такой процент случайных событий можно считать приемлемым, но необходимо стремиться к сокращению длительности стробирующего сигнала.

б) Точность реконструкции трека в установке в основном определяется многократным кулоновским рассеянием мюона в железе, и от координатного детектора не требуется рекордного пространственного разрешения.

в) Количество вещества по пучку детектора не критично, поскольку мюоны имеют высокую проникающую способность. В качестве координатного детектора, регистрирующего координаты рассеянного мюона в сердечнике тороидального магнита выбраны пропорциональные камеры.

Всего в установке 80 плоскостей пропорциональных камер размером $3 \times 3 \text{ м}^2$. Учитывая расположение мишени и обмоток в центре магнита и удобство монтажа камер в установке, каждая плоскость составлена из двух идентичных камер размером $3 \times 1,5 \text{ м}^2$ с вырезом на длинной стороне для мишени. Для сокращения числа каналов сигнальные проволочки ориентированы вдоль длинной стороны с шагом считывания 4 мм, что оправдано из-за существенно большей величины многократного рассеяния.

Сцинтилляционные триггерные счётчики, являясь составной частью координатного детектора, выполняют две функции:

- определяют присутствие частиц на определённом расстоянии от оси пучка;
 - определяют с хорошей точностью момент времени для считывания информации с пропорциональных камер.
- Также, как и пропорциональные камеры, каждая плоскость состоит из двух идентичных половин, а вся чувствительная область разделена на 7 радиальных зон (полуколец) одинаковой ширины по 142 мм. Ширина мёртвой зоны между кольцами 8 мм.
- По соображениям стоимости, жёсткости конструкции, прозрачности, временного разрешения и условий поставки сцинтилляторы счётчики изготовлены из жидкого сцинтиллятора NE-235 с длиной поглощения больше 4 м и временем высвечивания 4 нс. Общее количество плоскостей триггерных счётчиков - 20, по 2 на каждый супермодуль. Для обеспечения высокой эффективности необходимо иметь достаточно большое количество све-

та, поэтому толщина счётчика по сцинтиллятору выбрана равной 26 мм, а полная толщина 32 мм. Каждое полукольцо счётчика просматривается фотоумножителем с обеих сторон, поэтому полное число ФЭУ в установке 560. Фоновая загрузка каждого фотоумножителя около 10^6 I/сек. Разрешающее время лучше 1 нс, когда мюон пересекает центр полукольца и примерно 2 нс, когда он пересекает край полукольца.

Направление и координаты пучковых мюонов определяются с помощью годоскопов из быстрых сцинтилляционных счётчиков. Они имеют мозаичную структуру и удовлетворяют требованию азимутальной симметрии установки. Размеры отдельных элементов выбраны таким образом, чтобы на каждый элемент приходилось 3% всей интенсивности пучка. При интенсивности пучка мюонов 10^8 I/сек на каждый элемент приходится около $3 \cdot 10^6$ мюонов. Толщина каждого элемента выбрана равной 20 мм для обеспечения достаточного количества света. Пространственное разрешение годоскопа в центре пучка составляет 2 мм, а на периферии 9 мм, что по порядку величины соответствует среднему смещению из-за многократного рассеяния мюона с энергией 100 ГэВ, прошедшего в углероде 15 м. Общее число годоскопов в установке 3, число элементов 72, общее число фотоумножителей - 216, разрешающее время лучше 0,18 нс.

Защита установки от гало пучка осуществляется запрещающей системой из сцинтилляционных счётчиков общей площадью $\sim 22 \text{ м}^2$. Гало-мюоны являются главным потенциальным источником фона к глубокоэластичным взаимодействиям, поскольку каждый гало-мюон, входящий в установку спереди, совершает колебания по длине магнита и может быть неотличим от рассеянного. Отсюда вытекает главное требование к запрещающей системе - высокая эффективность регистрации и подавления мюонов.

Основным элементом запрещающей системы является стальной контейнер, заполненный жидким сцинтиллятором, с размерами $3 \times 3 \text{ м}^2$. В центре его имеется квадратное отверстие $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$, повторяющее форму выреза в координатном детекторе. Для обеспечения высокой эффективности регистрации мюонов толщина сцинтиллятора выбрана равной 100 мм, а вся поверхность просматривается посредством 24 фотоумножителей. Дополнительные твердые сцинтилляционные счётчики развивают площадь контейнера вниз, вверх и в стороны, а установленные на подвижной платформе позволяют дистанционно ограничивать диаметр пучка, направляемого в мишень. На каждый мюон, зарегистрированный системой, вырабатывается запрещающий импульс длительностью 60 нс. Коэффициент подавления гало-мюонов при этом был лучше 10^{-5} .

Так как глубокоэластичные события возникают равномерно по всей длине мишени, в задачу триггера установки входит требование обеспечить одинаковые условия запуска по всей длине установки. Второе требо-

вание заключается в том, что стробирующий сигнал для электроники пропорциональных камер должен появиться через 420 нс после пролёта рассеянного мюона, вызвавшего запуск установки.

Выполнить оба требования можно, используя принцип распределённой логики триггера (см. рис. 4).

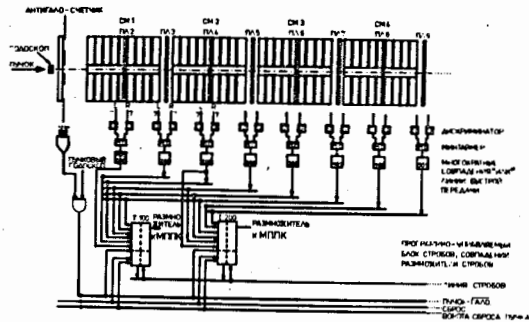


Рис. 4. Схема распределённой логики триггера.

Устройство MAO позволяет дистанционно с помощью ЭВМ установить желаемую конфигурацию колец триггерного счётчика и генерирует на выходе "сигнал плоскости" при прохождении мюона через триггерный счётчик. По коаксиальным волноводам с импедансом 50 Ом "сигналы плоскости" передаются в триггерные логические станции, установленные около каждого супермодуля точно по середине. Логические станции управляются от ЭВМ и позволяют дистанционно устанавливать желаемую комбинацию совпадений сигналов триггерных плоскостей. Скорость распространения сигналов по коаксиальному волноводу близка к скорости пролёта мюона через установку, тем самым обеспечивается синхронизация сигналов в триггерных станциях. Стандартным условием запуска установки для набора данных было совпадение во времени сигналов с любых четырёх триггерных счётчиков с сигналом пучка при отсутствии сигнала с запрещающей системы в любой из логических станций. Сигнал запуска, появившийся на выходе любой логической станции, формировался по длительности и поступал:

- на стробирование электроники пропорциональных камер, принадлежащих данному супермодулю;
- в быстрый коаксиальный волновод для стробирования электроники других супермодулей;
- в быстрый коаксиальный волновод для блокирования других логических станций на время считывания информации.

Распределённая логика триггера обеспечивала эффективную регистрацию трека мюона вниз по пучку на всю установку и на один супермодуль вверх против пучка. Контролировать установку вверх от точки взаимодействия необходимо, чтобы успешно бороться с запусками от гало мюонов, пропущенных запрещающей системой. Поскольку все элементы триггерной логики находились в зоне пучка, что исключало оперативное обслуживание, для их управления и контроля была разработана система SATAN^{*/}, которая позволяла с помощью ЭВМ изменять условия триггера и осуществлять непрерывный контроль работы каждым элементом триггерной логики.

Вся регистрирующая электроника, используемая в эксперименте, была выполнена в стандарте KAMAK. Каждые семь крейтов, объединённые ветвью KAMAK, считывались ROVD-контроллером, входящим в систему ROMULUS^{**/}. При размере одного события 500 слов и приёме 100-200 событий за один сброс общий массив данных составлял (50 + 100) тысяч слов. Передача этого массива приводила к мёртвому времени установки до 30%.

Для приёма данных, контроля и записи на ленту в эксперименте использовались три ЭВМ. HP-2116 MX-E с объёмом памяти 160K слов была предназначена исключительно для приёма и записи данных. В течение сброса пучка события принимались и последовательно записывались в буферную память объёмом 128K слов, а в паузах между сбросами пучка перезаписывались на магнитную ленту.

Комплекс ЭВМ NORD 10/50 с объёмом памяти 256K слов использовался для контроля и аппаратуры и самих данных. Через смеситель ветвей KAMAK информация параллельно с записью на ленту поступала в NORD 10/50 и использовалась для контроля с целью оперативного вмешательства. Через NORD 10/50 осуществлялось управление системой SATAN, упомянутой выше, и для "on-line" восстановления треков в установке для визуального контроля.

Четвёртая глава диссертации посвящена разработке и исследованию координатного детектора.

Учитывая особенности спектрометра в конструкции пропорциональных камер были заложены следующие требования:

- высокая идентичность и надёжность;
- жёсткость и самоподдерживаемость при минимальной толщине по пучку;
- минимальная нечувствительная область в месте стыковки двух камер в плоскость;

^{*/} F.Nanni, EP-NA4-NOTE (1977)

^{**/} P.J.Ponting, CERN/EP Electronics Note 80-01 (1980)

- наличие реперных отверстий с точной привязкой к первой сигнальной проволочке;
- отсутствие выступающих частей на поверхности камеры;
- сравнительная простота в серийном изготовлении;
- необходимость крепления регистрирующей электроники непосредственно на камере.

Наилучшим образом поставленным требованиям отвечала камера из самоподдерживающихся панелей, удовлетворяющих следующим требованиям:

- прогиб под действием собственного веса не превышает 1 см в середине;
- неплоскостность панели не превышает 50 мкм;
- освоено серийное производство панелей в промышленности;
- приемлемая стоимость панели;
- минимальный вес панели, что упрощает технологию изготовления.

Камера состоит из двух самоподдерживающихся панелей с сотовым наполнением, точных разделительных рам, определяющих зазор камеры и несущих на себе печатные платы для закрепления проволочного массива и разъёмов для подсоединения регистрирующей электроники. Внутренние стороны панелей имеют проводящее покрытие, действующее в качестве высоковольтных электродов. Четыре поддерживающих нити обеспечивают стабильность проволочного массива, а четыре разделительных упора, через которые производится сжатие с усилием 100 кг, обеспечивают постоянство в/в зазора камеры. Вес камеры в сборе ≤ 20 кг, количество материала по пучку $\leq 0,64$ г/см². Конструкция камеры полностью отвечала требованиям технологичности.

В изготовлении можно выделить три стадии:

- прецизионное изготовление корпуса камеры;
- изготовление проволочного массива с обеспечением точности шага и точности натяжения проволочек;
- тщательное обеспыливание внутренних частей перед окончательной сборкой.

Успешному выполнению каждой из стадий способствовал пооперационный контроль, необходимый в условиях серийного производства. Технологический цикл был рассчитан на изготовление трёх камер в неделю, чтобы уложиться в жёсткий график создания экспериментальной установки. Всего в ОИЯИ было изготовлено около 100 пропорциональных камер. Примерно столько же камер идентичной конструкции было изготовлено в САКЛЕ, Франция. Параллельное изготовление камер в двух центрах вызвано большим объёмом работ и сжатыми сроками создания установки. После изготовления камера подвергалась тщательному исследованию её характеристик. Использовать для этой цели пучок ускорителя не представлялось возможным из-за большой стоимости. Новая методика, разра-

ботанная для исследования характеристик камеры, основывалась на использовании радиоактивного источника ¹⁰⁶Ru, оборудованного монитором с малым количеством вещества. Монитор имел возможность перемещаться по всей площади камеры и обеспечивал скорость триггерных событий ~30 Гц с уровнем фона менее 0,03%, что позволяло проводить измерение счётной эффективности камеры на уровне лучше 99,9%, параметров кластерообразования в камере, амплитудных и временных характеристик камеры, исследовать различные варианты газовых смесей. Созданная методика используется и по сей день для исследования характеристик проволочных детекторов для других экспериментальных установок.

Измерения на стенде проводились с регистрирующей электроникой^{*/}, которая в дальнейшем использовалась в установке.

Выбор газовой смеси проводился на опытном образце в одну треть натуральной величины^{**/} в ЦЕРНе и на полномасштабных образцах камеры. С точки зрения шумов, ширины плато, амплитуды сигналов, высоковольтности и временного разрешения выбран оптимальный состав газовой смеси: (66,7-68,7)% -аргона, (28-30)% - изобутана, 3% - метилала и 0,3% - фреона. Во всех последующих измерениях и в процессе набора данных состав смеси не менялся.

Основные физические характеристики камеры сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Темновой ток при $U_k=5000$ В	$\leq 0,5$ мкА
Ширина плато при пороге регистрации 5 мкА	$\sim 630 \pm 75$ В
Среднее значение начала плато	$\sim 450 \pm 75$ В
Ширина временного спектра по основанию:	
в начале плато	~ 55 нс
в конце плато	~ 30 нс
Среднее значение амплитуды сигнала:	
в начале плато	~ 1 пК
в конце плато	~ 20 пК

Поскольку фоновая загрузка камер в установке ожидалась высокой, особенно в области близкой к пучку, на стенде была исследована зависимость камеры от загрузки, создаваемой дополнительным мощным радиоактивным источником. Потери в эффективности не были заметными вплоть до загрузки $2,5 \cdot 10^5$ I/канал·сек.

Все камеры после изготовления были проверены по упрощенной программе:

^{*/} PCOS II, Proportional chamber operating system, LeCroy Research Syst. Corp., Spring Valley, New York.

^{**/} Bussmann K. et al. CERN, EP Internal Report 76-10.

Темновой ток при $U_k = 5,2 \text{ кВ}$ — $\leq 1 \text{ мкА}$
 Частота импульсов каждой проволочки — $\leq 15-20 \text{ Гц}$
 Эффективность в 30 точках по площади — $\geq 99,5\%$
 Начало и конец плато в заданных пределах — $4500-5200 \text{ В}$

Разработанная методика обеспечила идентичность характеристик камер, в результате чего практически не потребовалась настройка камер в составе спектрометра, после доставки их из Москвы в Женеву самолётом.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию характеристик спектрометра на пучке мюонов.

Калибровка пропорциональных камер была проведена по трекам рассеянных мюонов, зарегистрированных в установке при работе с углеродной мишенью. Методика калибровки основывалась на определении разности между координатой трека, зарегистрированной исследуемой камерой и координатой трека, вычисленной из кубического многочлена, фитирующего данный трек. Процедура итеративно повторялась до получения необходимой точности. Камеры первого и десятого супермодулей калибровались по случайным прямым трекам гало-мюонов, пересекающим плоскость камер за пределами магнита и зарегистрированным одновременно с событиями неупругого рассеяния. Предложенная методика позволила провести калибровку камер по обеим координатам с точностью $\sigma = 0,2 \text{ мм}$, а по углу $\sigma = 0,31 \text{ мрад}$.

Для исследования эффективности камер было использовано около 100000 событий глубоконеупругого рассеяния мюонов на углероде. Эффективность определялась как отношение:

$$\varepsilon = \frac{N_k}{N_T} \quad (12)$$

где: N_k — число событий, зарегистрированных камерой в заданном коридоре шириной $\pm 1,2 \text{ см}$ от трека, а

N_T — число событий, прошедших через камеру и восстановленных по соседним камерам.

Исследования эффективности показали, что вся площадь камеры одинаково хорошо регистрирует рассеянные мюоны со средней величиной эффективности $\varepsilon = 97\%$. Отмечен незначительный спад в области выреза, обусловленный δ -электронами.

Исследования долговременной стабильности эффективности камер продиктованы особенностью установки — вести длительные сеансы по набору данных в условиях чередования знака заряда пучка, когда важна стабильность работы каждого элемента установки. Состав газовой смеси, скорость обмена газовой смеси в объёме камеры, ток и высоковольтное напряжение на камерах, а также работоспособность регистрирующей

электроники поддерживались постоянно на заданном уровне, что обусловило изменение средней величины эффективности камеры всего на $0,2\%$ в течение двухнедельного непрерывного сеанса. Общее представление о надёжности всей системы пропорциональных камер дают следующие данные за один год непрерывной работы, в течение которого вышли из строя:

- 3 сигнальные проволочки из общего числа ~ 6000 ;
- 120 гибридных схем PC-700 из общего числа ~ 15000 ;
- 5 карт регистрирующей электроники PC-7000 из общего числа 880.

Пространственное разрешение камер было исследовано на треках рассеянных мюонов, проходящих внутри магнита, и на прямых треках гало-мюонов вне магнита. Методика нахождения пространственного разрешения камер очень похожа на ту, что была использована для калибровки камер. Пространственное разрешение камер внутри магнита было найдено равным $\sigma = 1,55 \pm 0,01 \text{ мм}$, а вне его $\sigma = 1,33 \pm 0,02 \text{ мм}$, что существенно отличается от геометрического, обусловленного шагом сигнальных проволочек $\sigma = 1,15 \text{ мм}$.

Измерения эффективности кольцевых триггерных счётчиков были проведены в специальных сеансах с гало-мюонами при выключенном магнитном поле спектрометра. Эффективность измерялась для каждого фотомножителя, расположенного на дальнем крае полукольца, а триггер выделял мюоны, пересекающие ближний край кольца. Минимальный сигнал, с которым работали фотомножители триггерных счётчиков, составлял не более (4-6) фотоэлектронов в самом неблагоприятном случае. Пороги дискриминаторов были одинаковы и равны 30 мВ. Средняя эффективность триггерных счётчиков в этих условиях была выше 99%. Временное разрешение кольца самого большого диаметра (№7) было найдено не хуже $0,6 \text{ нс}$. Из измерения времени пролёта мюона между двумя любыми плоскостями триггерных счётчиков получено временное разрешение $\sigma = 2 \text{ нс}$.

Измерения временного разрешения пучковых годоскопов проводились в прямом пучке мюонов. Из время-пролётных измерений получено разрешение $\sigma \leq 200 \text{ пс}$.

Избирательность триггера измерялась во время сеансов по набору данных и при работе с углеродной мишенью и комбинации триггерных колец (2-7) составила $2,4 \cdot 10^{-5}$; $1,7 \cdot 10^{-5}$ и $4,2 \cdot 10^{-6}$ от интенсивности пучка при его энергии 280 ГэВ, 200 ГэВ и 120 ГэВ соответственно. Включение в триггер первых колец триггерных плоскостей повышало число запусков примерно в 20 раз.

Состав триггерных событий сильно зависел от первичной энергии пучка и в процентном выражении выглядел следующим образом: при энергиях пучка 280 ГэВ, 200 ГэВ и 120 ГэВ доля глубоконеупругих событий

составляла 14, 25 и 68% соответственно, доля событий, вызванных адронными ливнями, — 80, 60 и 26% соответственно и доля событий от гало-мюонов практически не зависела от энергии пучка и составляла 6%.

Разрешение спектрометра по импульсу, квадрату переданного импульса, скейлинговой переменной x и углу выхода рассеянного мюона из мишени были определены из большой статистики глубоконеупругих событий, зарегистрированных установкой при работе с углеродной мишенью и событий, сгенерированных по методу Монте-Карло. Исследуемый параметр определялся в каждом наборе событий, а разрешение находилось по формуле:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{A_{\text{ист}} - A_{\text{ген}}}{A_{\text{ген}}} \quad (13)$$

На рис. 5 представлены контуры одинакового аксептанса спектрометра для глубоконеупругих событий рассеяния мюонов на углероде при энергиях пучка 280 ГэВ, 200 ГэВ и 120 ГэВ.

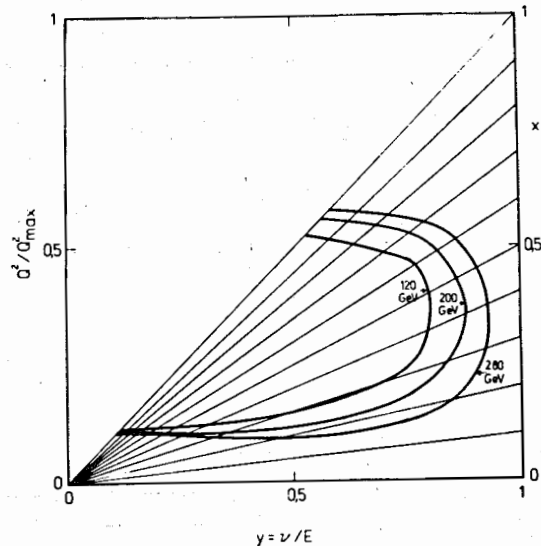


Рис. 5. Контур одинакового аксептанса при трёх значениях энергии мюонного пучка.

Внутри контура вероятность регистрации мюона выше 60%.

Шестая глава диссертации посвящена развитию установки. Почти двухлетний опыт работы установки с углеродной мишенью и переход на работу с водородной мишенью, связанный с использованием мюонных пучков предельной интенсивности, требовали улучшения работы всех элементов установки, чтобы достичь относительной точности измерений сечения взаимодействия мюонов лучше 1%. Второе направление совершенствования было связано с расширением кинематической области переменных, доступной для исследования, в сторону малых Q^2, x , что придавало установке логическую завершенность и лучшую возможность сравнения получаемых результатов с уже имеющимися.

На рис. 6 приведена схема расположения аппаратуры спектрометра в новой конфигурации.

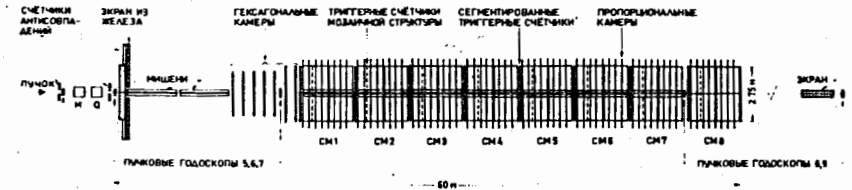


Рис. 6. Схема экспериментальной установки в новой конфигурации.

Вместо первых двух супермодулей установлен фронтальный спектрометр, состоящий из двух слегка выдвинутых вперёд жидководородных мишеней и 7 трёхплоскостных пропорциональных камер, установленных сразу за мишенями.

Для лучшего знания характеристик пучка, расширена система пучковых годоскопов со следующими функциями: годоскопические сцинтилляционные счётчики I5 и I6 (той же конструкции, что и ранее используемые) обеспечивали мониторинг мюонов пучка и определение точки входа в мишень, I7 и I8 обеспечивали измерение фазового пространства пучка, а I9 вместе с поглотителем из стали регистрировал мюоны, прошедшие через всю мишень без взаимодействия, и давал важную информацию, позволяющую однозначно выделить индивидуальный мюон, вызвавший запуск установки.

Запрещающая система была дополнена ещё одним сцинтилляционным

счётчиком, чтобы подавить составляющую гало-мюонов, которая попадала в установку под углом ~ 16 мрад к оси пучка.

Тороидальный спектрометр был дооборудован новыми плоскостями триггерных счётчиков мозаичной структуры, которые позволили:

- устранить геометрическую неэффективность триггерных кольцевых счётчиков (промежутки между кольцами);
- увеличить быстродействие триггерной плоскости;
- ввести комбинаторику триггерных плоскостей в триггере, оставив неизменным его длину;
- уменьшить чувствительность триггерной плоскости к электромагнитному фону от адронных ливней.

Фронтальный спектрометр обеспечивал измерение траектории рассеянных мюонов и восстановление вершины взаимодействия в первых двух мишенях. Рис. 7. а, б иллюстрирует распределение координат вершин взаимодействий, восстановленных фронтальным спектрометром с полной (а) и пустой (б) мишенями, характеризующий распределение вещества в пучке.

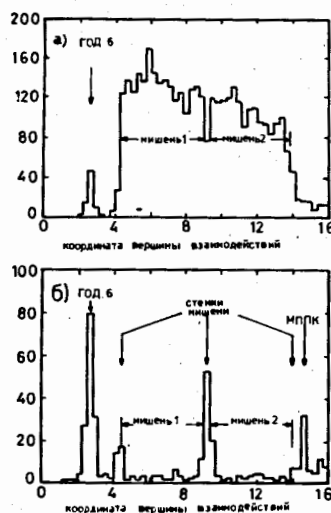


Рис. 7. Распределение координат вершин взаимодействий мюонов в первых двух мишенях:
а) случай полной мишени;
б) случай пустой мишени.

Триггер установки претерпел существенные изменения:

- сокращено время на выработку запуска установки, что позволило подавать сигнал "Строб" на регистрирующую электронику камер трёх супермодулей (15 м) вверх против пучка и отслеживать с большей эффективностью треки гало-мюонов;

- разделена вся аппаратура электрически на левую и правую половины, что существенно сократило число фоновых запусков от адронных ливней (поперечные размеры ливня таковы, что захватывают обе половины, а рассеянный мюон находится в одной половине);

- разработана новая матрица совпадений сигналов с триггерных плоскостей, позволившая поднять быстродействие и эффективность триггера.

Избирательность первого уровня триггера составила для энергии пучка 280 ГэВ - $1,2 \cdot 10^{-4}$; 200 ГэВ - $7,5 \cdot 10^{-5}$ и 120 ГэВ - $3 \cdot 10^{-5}$. Дальнейшее снижение доли фоновых запусков было достигнуто на втором уровне с помощью информации от пропорциональных камер (для трека рассеянного мюона требовалось срабатывание четырёх из шести подряд расположенных камер), что в 10-20 раз уменьшало частоту запусков установки.

Из записанных на магнитную ленту событий доля глубоконеупругих составляла 50% при 120 ГэВ и 10% - при 280 ГэВ.

Регистрирующая электроника была реорганизована в 6 бранч-ветвей в соответствии с системой REMUS ^{*/}, что позволило примерно вдвое сократить время на считывание информации. 100-200 событий, принимаемых за один цикл ускорителя, составляли массив данных (45-90) тысяч слов. Передача его с циклом КАМАК приводила к мёртвому времени установки 15%.

Основу фронтального спектрометра составили 3-х плоскостные гексагональные камеры с диаметром вписанного круга (чувствительной зоной) 1,5 м. Они были изготовлены по аналогии с камерами тороидального спектрометра из самоподдерживающихся панелей гексагональной формы толщиной 21 мм.

Сечение гексагональной камеры приведено на рис.8. Центральная зона камер диаметром 100 мм могла работать без разрушения в высокоинтенсивном пучке мюонов при пониженной эффективности и использовалась для изучения характеристик самого пучка.

Основные характеристики камеры приведены в таблице 3.

^{*/}

P.Ponting, CERN/EP Electronics Note 80-01 (1980).

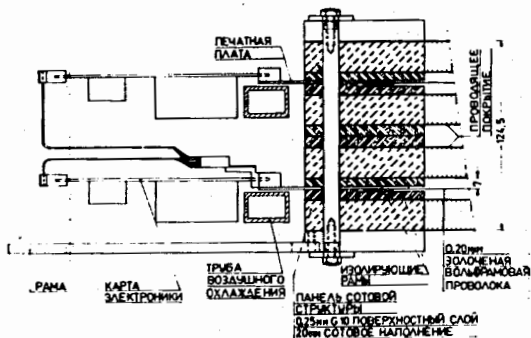


Рис. 8. Сечение гексагональной пропорциональной камеры.

Шаг сигнальных проволок	- 2 мм
Расстояние между плоскостью сигнальных проволок и высоковольтными электродами	- 7 мм
Общее число проволок	- 3x768
Число плоскостей	- 3
Высоковольтное напряжение	- 4,4 кВ
Высоковольтное напряжение центральной зоны	- 3,7 кВ
Ширина плато	- ≥ 600 В
Разброс по началу плато	- ≤ 100 В
Порог электроники	- 5 мкА
Длительность стробирующего сигнала	- 100 нс
Пространственное разрешение	- $\leq 0,9$ мм

Фронтальный спектрометр позволил существенно расширить область кинематических переменных глубоконеупругого рассеяния мюонов, доступную для исследований.

Седьмая глава диссертации посвящена контролю установки при проведении рабочих сеансов и основным экспериментам, выполненным на установке.

Высокое качество экспериментальных данных, полученных на установке, было обеспечено постоянным контролем работоспособности всех узлов спектрометра. Во время набора данных контролировались:

- аналого-цифровые преобразователи;
- время-цифровые преобразователи;
- быстрые регистры памяти;

- сдвиговые регистры камерной электроники;
- эффективность триггерной логики;
- индукция магнитного поля в тороидальном магните;
- шумы пропорциональных камер;
- эффективность пропорциональных камер;
- эффективность отдельных фотоумножителей триггерных и пучковых годоскопических счётчиков;
- распределение вершин взаимодействий по длине установки.

При появлении нерегулярностей в работе аппаратуры на экране центрального монитора появлялся краткий комментарий состояния аппаратуры. Кроме того, вся информация, относящаяся к контролю установки, записывалась на магнитную ленту и могла быть прочитана в случае необходимости при последующем анализе данных.

Хронологически первыми на установке были проведены эксперименты по рассеянию мюонов на углеродной мишени. Набор данных проходил в течение всего 1979 года сеансами продолжительностью 12 суток каждый с перерывами между сеансами по 2 суток. Общая статистика набранных событий составила около 10 миллионов при энергиях пучка 120 ГэВ, 200 ГэВ и 280 ГэВ.

В процессе вычисления структурных функций нуклона использовались общепринятые допущения:

- функция $R(x, Q^2) = 0$
- вклад каждого нуклона в ядре аддитивен, т.е.

$$F_2(x, Q^2) = F_2^c(x, Q^2)/12 \quad (14)$$

- поправки на искажение за счёт Ферми-движения нуклонов в мишени не делались.

Особое внимание было уделено калибровке магнитного поля в тороидальном магните и светимости установки.

В вычислениях структурных функций использованы $1,5 \cdot 10^6$ глубоконеупругих событий в кинематическом диапазоне переменных по x $-(0,25+0,8)$ и по Q^2 $-(25+280)$ ГэВ². Данные характеризуются минимальным из достигнутых на сегодня уровнем как статистических, так и систематических ошибок.

Следующим важным экспериментом стал эксперимент по измерению электрослабой асимметрии. Как известно, теория электрослабого взаимодействия ^{*}/ предусматривает два механизма глубоконеупругого рассеяния мюона на нуклоне - возможен обмен либо δ -фотоном, либо Z^0 -бозоном, причём вследствие большой массы Z^0 -бозона и малой величины константы слабого взаимодействия теория предсказывает интерференцию

^{*}/S.Weinberg, Phys.Rev.Lett. 19:1264 (1967).

механизмов обмена, зависящую от Q^2 , как $10^{-4} \cdot Q^2$. Техника извлечения интерференции механизмов обмена заключается в измерении асимметрии В сечений взаимодействия положительно заряженных мюонов с отрицательной продольной поляризацией и отрицательно заряженных мюонов с положительной продольной поляризацией.

$$B = \frac{\sigma^+(-\lambda) - \sigma^- (+\lambda)}{\sigma^+(-\lambda) + \sigma^- (+\lambda)}, \quad (15)$$

которая в рамках стандартной модели может быть выражена, как функция от $g(y) \cdot Q^2$, где $g(y)$ – кинематический параметр, определяемый через скейлинговую переменную y :

$$g(y) = \frac{1 - (1-y)^2}{1 + (1-y)^2} \quad (16)$$

Измерения были проведены в 1980 г. в течение 8 периодов по 12 суток при двух начальных энергиях пучка 120 ГэВ и 280 ГэВ в рамках общего набора данных на углеродной мишени.

Поскольку измеряемый эффект очень мал, требования к стабильности аппаратуры очень высоки. С этой целью:

- заряд пучка менялся дважды в течение каждого периода;
- магнитное поле тороидального магнита поддерживалось стабильным вследствие того, что перемагничивание всегда проходило по одной и той же петле гистерезиса с управлением от ЭВМ;
- интенсивность пучков поддерживалась постоянной на уровне $2 \cdot 10^7$ мюонов/сброс.

Стабильность работы аппаратуры характеризует тот факт, что внутри периода эффективность пропорциональных камер изменялась на величину, меньшую 0,2%.

Результаты измерений хорошо согласуются с предсказаниями стандартной модели, если синус угла смешивания $\sin^2 \theta_w$ принять равным $\sin^2 \theta_w = 0,23$.

Специальный эксперимент был выполнен по проверке EMC-эффекта \neq уже в новой конфигурации спектрометра. В эксперименте EMC в ходе изучения структурных функций нуклона было показано, что отношение структурных функций нуклона на железе и дейтерии $1/56 F_2^{Fe} / 1/2 F_2^{HD}$ имеет монотонно спадающий характер в зависимости от скейлинговой переменной x , причём это отношение при малых x больше, а при больших x оно меньше 1. Полученный результат находился в полном противоречии с предсказаниями теории.

Цель эксперимента заключалась в следующем:

\neq

J.J.Aubert et al. Phys. Lett. 123 B (1983) 275.

- подтвердить эффект с большей достоверностью;
- измерить отношение структурных функций нуклона для железа и дейтерия, а также азота и дейтерия;
- исследовать зависимость отношения структурных функций нуклона от

Измерения проводились на пучке мюонов с энергией 200 ГэВ, общий поток мюонов, пропущенный через установку составил $2,3 \cdot 10^{17}$. Данные эксперимента хорошо совпадают с данными EMC при $x > 0,15$, а в области $x < 0,15$ наблюдается отличие в характере поведения на уровне $\sim 5\%$.

Структурные функции протона были измерены на водородной мишени длиной 40 м. Общая статистика глубокоэластичных событий, вошедших в анализ, составила 1,8 миллиона при первичных энергиях пучка 100 ГэВ, 120 ГэВ, 200 ГэВ и 280 ГэВ. Ошибка в определении структурной функции $F_2(x, Q^2)$ из-за неопределённости в энергии первичного мюона, в индукции магнитного поля спектрометра, в учёте энергетических потерь мюона в железе и т.д. не превышает 1%, что является лучшим на сегодня результатом, достигнутым в измерениях структурных функций нуклона. Из Экспериментальной зависимости $F_2(x, Q^2)$ от Q^2 определено значение масштабного параметра КХД-теории $\lambda_{QCD} = 220$ МэВ также с наименьшей на сегодня ошибкой.

В заключении приводятся основные выводы диссертации.

Основные выводы:

1. В связи с программой первоочередных экспериментов на 400-ГэВном протонном ускорителе ЦЕРН для исследования глубокоэластичного взаимодействия мюонов высоких энергий создана крупнейшая экспериментальная установка нового типа – распределенный спектрометр, включающий в себя протяженную мишень длиной 40 м, окруженную тороидальным магнитом, у которого между стальными дисками размещены детекторы для регистрации рассеянного мюона. Основу установки составлял распределенный координатный детектор из 80 плоскостей пропорциональных камер размером 3×3 м².

2. Предложены и исследованы принципы создания распределенного координатного детектора мюонов на основе проволочных пропорциональных камер.

3. Предложен новый тип конструкции большой проволочной камеры на основе панелей с сотовым наполнением, имеющих малое количество вещества ($0,64$ г/см²) по пучку, изготовлены и проведены исследования прототипов. Разработана технология массового изготовления больших пропорциональных камер, отличительной особенностью которой являлся непрерывный контроль всех операций, обеспечивающий высокую идентичность характеристик камер.

4. Для обеспечения изготовления в сжатые сроки большого количества пропорциональных камер была разработана и создана научно-методическая база, позволившая менее чем за 2 года изготовить, испытать и полностью подготовить к работе на пучке около 100 пропорциональных камер размером $3 \times 1,5 \text{ м}^2$. Эта научно-методическая база в дальнейшем послужила основой для создания других крупных экспериментальных установок

5. С целью экономии дорогостоящего ускорительного времени предложена и реализована методика исследования характеристик пропорциональных камер без пучка с помощью радиоактивного источника, создана соответствующая аппаратура и проведены исследования всех камер координатного детектора установки. Эта методика нашла применение и при создании других экспериментальных установок.

6. В результате созданной методики все изготовленные камеры имели идентичные характеристики, поэтому в короткий срок на пучке в ЦЕРН осуществлены монтаж и запуск экспериментальной установки, произведена комплексная настройка всех детекторов совместно с регистрирующей электронной аппаратурой.

7. Исследованы в реальных условиях проведения эксперимента при длительности индивидуальных сеансов до 2000 часов на пучках мюонов с энергиями 100–280 ГэВ характеристики установки, изучено влияние на эти характеристики различных параметров, разработаны методики, обеспечившие высокую стабильность характеристик установки на протяжении 7-летней экспозиции в пучках частиц высокой интенсивности.

8. Предложено и реализовано развитие экспериментальной установки, направленное на повышение точности измерений сечений глубоконеупругого взаимодействия мюонов и расширения кинематической области измерений в сторону малых x и q^2 . Это позволило расширить программу физических исследований.

9. В процессе усовершенствования установки предложен и реализован способ повышения эффективности триггера путем использования в триггере обобщенной информации с пропорциональных камер, а также введения дополнительных сцинтилляционных счетчиков мозаичной структуры. Проведены методические исследования на пучках различных энергий, в результате которых выбрана оптимальная логика триггера.

10. Предложен, создан и в короткий срок запущен спектрометр, дополняющий основную конфигурацию и состоящий из гексагональных камер с диаметром чувствительной зоны около 1,5 м. Спектрометр позволил существенно расширить доступную кинематическую область измерений в сторону малых q^2 , x ($q^2 \geq 8 \text{ ГэВ}^2$; $x \geq 0,05$).

II. Обеспечена стабильная работа установки и высокое качество экспериментальной информации при выполнении широкой программы исследования глубоконеупругого рассеяния мюонов на различных мишенях. Экспериментальная установка проработала на мюонном пучке СИС ЦЕРН с 1978 по 1985 год, на ней было зарегистрировано рекордное на то время число (100 млн.) глубоконеупругих взаимодействий мюонов на ядрах мишеней ^1H , ^2D , ^{12}C , ^{14}N , ^{56}Fe .

На основе этого материала с участием автора:

- измерены с высокой точностью (3%) структурные функции нуклона в ядрах водорода, дейтерия, углерода, выполнен физический анализ структурных функций и определено значение масштабного параметра КХД-теории $-A$;
- впервые обнаружена во взаимодействии поляризованных мюонов с нуклонами интерференция слабого и электромагнитного взаимодействий и измерены в рамках стандартной модели значения констант связи мюона с промежуточным Z^0 -бозоном;
- измерены с наименьшими на сегодня ошибками (1–3%) ядерные эффекты в структурных функциях нуклонов, проявляющиеся в специфической x -зависимости отношения структурных функций свободных и связанных в ядре нуклонов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. D. Bollini et al. A high luminosity spectrometer for deep inelastic muon scattering experiments. Nucl. Instr. and Meth. 204 (1983) 333.
2. A. C. Benvenuti et al. An upgraded configuration of a high luminosity spectrometer for deep inelastic muon scattering experiments. Nucl. Instr. and Meth. 226 (1984) 330.
3. А. В. Вишневский, ..., Ю. Т. Киришин, ..., Ю. А. Яцуенко. Пропорциональная камера размером $(3 \times 1,5) \text{ м}^2$ и её характеристики. ОИЯИ, Р-13-10856, Дубна, 1977, ПТЭ, 3, 1979, 60.
4. А. В. Вишневский, ..., Ю. Т. Киришин, ..., Ю. А. Яцуенко. Характеристики пропорциональной камеры размерами $(3 \times 1,5) \text{ м}^2$ в условиях больших загрузок. ОИЯИ, Р13-10939, Дубна, 1977, ПТЭ, 3, 1979, 63.
5. Ю. Т. Киришин. Измерения амплитудных и временных спектров пропорциональной камеры $3 \times 1,5 \text{ м}^2$. Сообщение ОИЯИ, Р13-85-643, Дубна, 1985.
6. Ю. Т. Киришин, П. Тодоров. Эффективность пропорциональных камер эксперимента VCDMS по изучению глубоконеупругого рассеяния мюонов. ОИЯИ, Р13-85-644, Дубна, 1985.

7. К.Буссмани,..., Ю.Т.Киришин,..., В.С.Хабаров. Гексагональные пропорциональные камеры с чувствительной зоной диаметром 1536 мм. ОИЯИ, Р13-85-642, Дубна, 1985.
8. A.C. Benvenuti et al. A high statistics measurement of the nucleon structure function $F_2(x, Q^2)$ from deep inelastic muon-carbon scattering at high Q^2 . ОИЯИ, ЕИ-87-549, Дубна, 1987, Phys. Lett., 195 B (1987) 91.
9. A. Argento et al., Electroweak asymmetry in deep inelastic muon-nucleon scattering. ОИЯИ, ЕИ-82-847, Дубна, 1982, Phys. Lett., 120 B (1983) 245.
10. A.C. Benvenuti et al., Nuclear effects in deep inelastic muon scattering on deuterium and iron targets. ОИЯИ, ЕИ-87-99, Дубна, 1987, Phys. Lett., 189 B (1987) 245.
11. A.C. Benvenuti et al., A high statistics measurement of the proton structure functions $F_2(x, Q^2)$ and R from deep inelastic muon scattering at high Q^2 . Phys. Lett. 223 B (1989) 485.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 сентября 1989 года.