

Л.33

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Институт ядерной физики

На правах рукописи
УДК 539.12

ЛЕБЕДЕВ Павел Константинович

ОБРАЗОВАНИЕ АДРОНОВ МАЛЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПРОТОН-
ЯДЕРНЫХ СОУДАРЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 70 ГэВ

(01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных
частиц)

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата физико-математических
наук

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИЯИ 70
г. Новосибирск
1983

Работа выполнена в Институте ядерной физики Сибирского отделения Академии наук СССР.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

БАРКОВ Лев Митрофанович - доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корр. АН СССР (Институт ядерной физики СО АН СССР, г. Новосибирск)

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ

РАДКЕВИЧ Игорь Александрович - доктор физ.-мат. наук, профессор (ИТЭФ, Москва)

ВСЕВОЛОЖСКАЯ Татьяна Алексеевна - кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник (ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск)

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

Московский инженерно-физический институт, г. Москва

Защита диссертации состоится "4" июня 1983 г. в 12 час на заседании специализированного совета Д.002.24.01 при Институте ядерной физики СО АН СССР. Адрес: г. Новосибирск-90, проспект академика Лаврентьева, II, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ по адресу: г. Новосибирск-90, проспект академика Лаврентьева, II.

Автореферат разослан "20" мая 1983 г.

Ученый секретарь специализированного совета, доктор физ.-мат. наук

Я. С. ДЕРЕБЕНЕВ

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. В настоящее время исследование закономерностей процессов соударения адронов высокой энергии с атомными ядрами вызывает большой интерес. Это обусловлено возможностью получения новой физической информации как о пространственно-временной картине сильного взаимодействия адронов, так и о внутренней их структуре.

Значительное место в этих исследованиях занимает изучение инклюзивных спектров вторичных адронов, генерируемых в процессе адрон-ядерного взаимодействия. В то время как поведение инклюзивных спектров адронов в области больших импульсов вторичных частиц, т.е. в области фрагментации пучка, в опытах на современных ускорителях изучено достаточно подробно, информация по инклюзивному образованию адронов в области малых импульсов, включающей центральную часть спектра и область фрагментации ядра, практически отсутствует.

Измерения выходов вторичных частиц малых импульсов в протон-ядерных соударениях при высокой энергии важны также и с практической точки зрения. Особенно актуальными являются измерения выходов антипротонов малых импульсов на ядерных мишенях. Эти данные необходимы при проектировании антипротонных источников для ускорительных комплексов с протон-антипротонными встречными пучками. В частности, данные по выходам антипротонов при энергии 70 ГэВ необходимы для выбора оптимальных параметров антипротонного источника в проекте УНК ИФВЭ. С этой точки зрения, интерес представляют также данные по зависимости выходов антипротонов малых импульсов от атомного веса ядра-мишени.

Цель проведенной работы состояла в измерении сечения образования вторичных адронов малых импульсов (x^2 , k^* , \bar{p} и p) в протон-ядерных соударениях при энергии 70 ГэВ и определении поведения инклюзивных спектров этих частиц в центральной части спектра и области фрагментации ядра; исследовании зависимости сечений образования вторичных адронов от атомного веса ядра-мишени. При этом в связи с практической важностью особое внимание уделялось получению результатов для антипротонов.

Научная новизна работы. Впервые измерены сечения образования вторичных адронов (π^{\pm} , K^{\pm} , \bar{p} и p) в протон-ядерных столкновениях при высокой энергии в области малых импульсов вторичных частиц. Эти данные позволили впервые на ускорителях высокой энергии определить поведение инклюзивных спектров в центральной части спектра и области фрагментации ядра, измерить A -зависимости выходов вторичных адронов и их отношений в этой области импульсов. Впервые измерены также относительные выходы адронов в соударениях протонов с ядрами.

В работе показана применимость для измерения сечений образования адронов малых импульсов в экспериментах на ускорителях методики ядерных фотозумульсий. В этом случае в отличие от счетчиковой методики регистрации вторичных частиц для проведения эксперимента не требуется сложных систем вывода пучка из ускорителя таких как медленный и дифракционный выходы, и облучение фотозумульсии можно проводить с использованием простой системы - быстрого вывода. Ее применение значительно сократило время подготовки и проведения эксперимента по измерению выходов адронов с импульсами до 1 ГэВ/с.

Практическая значимость результатов исследования. Как это следует из результатов экспериментов с 70 ГэВ протонами, описанных в этой работе, и результатов работы, выполненной в ИФВЭ в области фрагментации пучка (Божко и др., 1979), максимум спектра антипротонов находится для протон-ядерных столкновений при импульсе 4 ГэВ/с, а не при импульсе 6 ГэВ/с, как для протон-протонных соударений при этой энергии. Это обстоятельство имеет большое практическое значение, так как позволяет существенно уменьшить импульс антипротонов, захваченных с мишени антипротонного источника и, следовательно, уменьшить размеры кольца-замедлителя в проекте антипротонного источника УНК ИФВЭ (Всеволожская и др., 1981). Более того, измеренные выходы антипротонов при импульсе 1,5 ГэВ/с оказались достаточно большими для того, чтобы заново рассмотреть "старый" вариант источника антипротонов для УНК ИФВЭ (Будкер и др., 1976), в котором не используется промежуточное кольцо-замедлитель.

Кроме данных по выходам антипротонов малых импульсов, конкретное практическое значение имеют также полученные данные по выходам и другим адронам. Эти данные найдут применение при

планировании и проведении экспериментов на вторичных пучках адронов, в вопросах оценки фона, в вопросах радиационной защиты ускорителей и т.д.

Полученные данные позволили сравнить в этой части спектра предсказания современных моделей адрон-ядерных соударений с экспериментальными данными для пионов, протонов и антипротонов. Сравнение показало, что учет взаимодействия вторичных частиц в ядре оказывает большое влияние на предсказания моделей в этой области импульсов. Это обстоятельство позволяет согласовать с экспериментальными данными в этой части спектра предсказания практически всех имеющихся моделей и, тем самым, затрудняет их выбор. Однако, эти данные открывают возможность для проверки моделей адрон-ядерных соударений при высокой энергии практически во всем диапазоне импульсов вторичных частиц при энергии 70 ГэВ и в этом состоит их дополнительная ценность.

Автор выносит на защиту следующие результаты и выводы проделанной работы:

1. С помощью методики ядерных фотозумульсий и времяпролетной методики измерены сечения образования вторичных адронов с импульсом от 0,4 ГэВ/с до 3 ГэВ/с в соударениях протонов с энергией 70 ГэВ с ядрами Al и W ;

2. эти измерения позволили впервые на ускорителях высоких энергий определить поведение спектров антипротонов, протонов, каонов и пионов в центральной области спектра вторичных частиц и области фрагментации ядра;

3. измерения показали, что спектр антипротонов при энергии 70 ГэВ в протон-ядерных соударениях, построенный по результатам данной работы и результатам эксперимента, выполненного ранее в области больших импульсов, смещен в сторону малых импульсов по сравнению со спектром в протон-протонных соударениях. Максимум спектра антипротонов для протон-ядерных соударений находится примерно при импульсе 4 ГэВ/с, а не при импульсе 6 ГэВ/с, как для протон-протонных соударений;

4. полученные данные по выходам антипротонов малых импульсов на ядрах позволили сделать рекомендации по упрощению имеющегося в настоящее время проекта антипротонного источника для встречных протон-антипротонных колец УНК ИФВЭ. В частности,

возможно существенно уменьшить импульс антипротонов, захватываемых в кольцо-замедлитель антипротонного источника и, тем самым, значительно сократить его размеры и стоимость.

Более того, как показывают оценки при некоторой потере в скорости накопления антипротонов вообще можно исключить кольцо-замедлитель из схемы антипротонного источника;

5. на основе результатов проведенных экспериментов впервые определена A -зависимость сечений образования пионов, каонов, антипротонов и протонов в области малых импульсов;

6. получены отношения выходов адронов различных сортов в области малых импульсов частиц на ядрах;

7. сравнение полученных в проведенных экспериментах данных с предсказаниями теоретических моделей адрон-ядерных столкновений, показывало, что при учете взаимодействия вторичных адронов в ядре большинство имеющихся моделей неплохо согласуется в области малых импульсов с экспериментом. В связи с этим трудно отдать предпочтение какой-либо из них.

Структура работы. Основной текст диссертации состоит из введения, пяти глав и заключения. Текст диссертации содержит 128 страниц, 42 рисунка и 8 таблиц. Список литературы состоит из 93 наименований.

Апробация диссертационной работы. В диссертации обобщены результаты работ, выполненных автором в 1977-1982 г.г. Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Института ядерной физики СО АН СССР, Института физики высоких энергий (г.Серпухов), а также на сессии отделения ядерной физики АН СССР (1980 г.), 6 Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 1981), 7 Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1981), Всесоюзном проблемном семинаре "Взаимодействие частиц и ядер высокой энергии с ядрами" (Ташкент, 1981 г.).

Содержание работы

Во введении обсуждается необходимость постановки экспериментов по измерению сечения образования адронов малых импульсов на ускорителе ИФВЭ. Отмечается важность такой информации

для определения поведения спектра вторичных адронов в области малых импульсов, что представляет интерес как для физики адрон-ядерных столкновений при высоких энергиях, так и для практического применения этих данных, в частности, для разработки проекта встречных протон-антипротонных пучков УНК ИФВЭ. Обсуждается известная до начала экспериментов информация по инклюзивным спектрам вторичных адронов в центральной части спектра и области фрагментации ядра и существование предсказания теоретических моделей. В конце этого раздела приведены основные результаты работы, полученные в данной диссертации.

В первой главе описывается методика определения дифференциальных сечений инклюзивного образования вторичных частиц на магнитооптических каналах. Отмечено, что большую роль при определении сечений образования вторичных адронов играет корректность расчетов аксептанса спектрометра. Для обеспечения надежности расчетов этой величины оказались необходимыми предварительные измерения характеристик магнитооптического канала. В этой главе обсуждаются различные факторы, оказывающие влияние на расчетную величину аксептанса спектрометра и приводятся оценки величины наиболее важных из них.

Вторая глава посвящена описанию магнитооптического канала и измерениям его параметров, важных для определения сечений образования вторичных адронов. Рассмотрено функциональное назначение элементов канала и их влияние на величину аксептанса спектрометра. Подробно рассматриваются вопросы коллимирования вторичного пучка, выбор места расположения коллиматоров на канале; вопросы измерения характеристик магнитных элементов канала: привязка импульса частиц и режимов отклоняющих магнитов методом токовой нити, измерение распределений магнитных полей в отклоняющих магнитах, их однородности и меры, которые были приняты для улучшения однородности полей в магнитах; измерение градиентов магнитных полей в линзах; вопросы геодезических измерений взаимного расположения мишени, магнитооптических элементов канала и коллиматоров друг относительно друга. Показано, что наибольшее влияние на величину аксептанса спектрометра оказывает смещение по вертикали мишени относительно объектива из первых линз канала.

Описываются измерения характеристик вторичного пучка в канале, его размеров, положения и угловых распределений частиц при различных режимах настройки канала. Измеренные характеристики вторичного пучка сравниваются с расчетными. Полученное согласие расчетных и измеренных параметров вторичного пучка является свидетельством корректности определения величины аксептанса канала расчетным путем.

В последнем разделе второй главы излагается общая процедура расчетов аксептанса спектрометра методом Монте-Карло. Перечисляются факторы, учтенные при расчете: размеры и положение протонного пучка на мишени, угловые распределения вторичных адронов при рождении в мишени, смещения мишени и элементов канала друг относительно друга, рассеяние в мишени и счетчиках и т.д. Подробно обсуждаются принятые при расчетах угловые зависимости сечений образования вторичных адронов, которые необходимо учитывать из-за захвата частиц в спектрометр в широком диапазоне углов. Показано, что в интервале углов до 60 мрад, в котором происходит захват частиц в спектрометр, угловые распределения вторичных адронов в pA -соударениях можно принять такими же, как для pp -соударений. Далее в этой главе обсуждаются ошибки расчетной величины аксептанса спектрометра.

В третьей главе описывается проведенный на рассмотренном в предыдущей главе магнитооптическом канале эксперимент по измерению сечений образования вторичных адронов с применением ядерной фотоэмульсии как детектора частиц вторичного пучка. Эта простая методика оказалась удобной при проведении измерений до импульса антипротонов 0,8 ГэВ/с. В этом диапазоне импульсов антипротоны имеют существенно большую плотность зерен на треках, чем остальные частицы вторичного пучка (e, μ, π), что позволяет легко выделять их визуально при просмотре фотоэмульсии.

Важное преимущество этой методики регистрации вторичных частиц малых импульсов по сравнению со счетчиковой методикой состоит в том, что в этом случае не требуется применения сложных систем вывода пучка из ускорителя, таких как медленный и дифракционный выходы и облучения фотоэмульсии можно проводить с использованием простой системы - быстрого вывода. Кроме того,

значительно сокращаются затраты на подготовку эксперимента и время его проведения на ускорителе.

В эксперименте были измерены сечения образования пионов, протонов и антипротонов в соударениях протонов с энергией 70 ГэВ с ядрами Ae и W . Сечения образования антипротонов измерялись при значениях импульса 0,4; 0,6 и 0,8 ГэВ/с, при которых плотность зерен на их следах превышает плотность зерен на следах релятивистских частиц соответственно в 3; 2 и 1,5 раза. Сечения образования отрицательных пионов были измерены при значениях импульса 0,4; 0,6; 0,8; 1,07 и 2 ГэВ/с; положительных пионов - при импульсах 0,4; 0,6 и 2 ГэВ/с и протонов при импульсах 0,4 и 0,6 ГэВ/с.

В этой главе описывается выбор мишеней эксперимента, подготовка и облучение эмульсионных слоев, их просмотр и определение числа вторичных адронов каждого сорта. Особое внимание уделено идентификации антипротонов и отделению фоновых событий. Показано, что для выделения антипротонов среди отобранных при просмотре следов достаточно измерений плотности зерен на следе η^* , угла погружения α и угла β в плоскости фотослоя относительно соседних релятивистских следов. Дополнительным методом проверки правильности отбора антипротонов служило сравнение углов многократного рассеяния на отобранных следах и следах протонов такого же импульса.

При значениях импульса частиц, при которых проводилось облучение фотоэмульсии, пучок частиц с минимальной ионизацией состоит из пионов, мюонов и электронов. Для определения числа пионов во вторичном пучке из полного числа частиц с минимальной ионизацией вычитались мюоны и электроны. Примесь мюонов в пучке от распада пионов на длине канала получалась при моделировании прохождения пионного пучка по каналу.

Отмечено, что основной трудностью для нахождения сечений образования пионов в этом эксперименте является определение примеси электронов во вторичном пучке. Этот вопрос подробно излагается в отдельном разделе этой главы.

Как известно, источником электронов во вторичном адронном пучке малых импульсов являются нейтральные пионы, χ -кванты от распада которых конвертируют в мишени в электрон-позитронные

пары. При этом все пионы с большими импульсами, чем заданный, дают вклад в образование электронов. Поэтому для расчетов примеси электронов во вторичном пучке при некотором значении импульса необходимо знать спектр нейтральных пионов при больших импульсах. Этот спектр принимался равным полусумме спектров положительных и отрицательных пионов, которые были известны из проведенных при энергии 70 ГэВ измерений (Антипов и др., 1970; Божко и др., 1979; Барков и др., 1981). В дальнейшем, при значениях импульса вторичных частиц 0,4 и 0,6 ГэВ/с правильность этого расчета проверялась экспериментально путем измерения ионизации на следах электронов и пионов, так как при этих импульсах электроны имеют несколько большую плотность зерен на треках, чем пионы. Приводится методика расчета и сравнение полученных результатов по примеси электронов в пучке с экспериментом. Показано их неплохое согласие.

Для определения количества протонов во вторичном пучке использовалось то обстоятельство, что при импульсах 0,4 и 0,6 ГэВ/с, плотность ионизации на их треках соответственно в 3 и 2 раза превышала плотность ионизации на следах релятивистских частиц. Поэтому эти следы легко выделялись при визуальном просмотре фотослоев.

Далее в этой главе подробно обсуждаются вопросы мониторинга протонного и вторичного пучков при проведении эксперимента. Описаны конструкции применяемых координатной вторично-эмиссионной камеры с шагом чувствительных проволок 0,4 мм и пропорциональной камеры с интегральным съемом информации. Приведены результаты измерения параметров пучков в эксперименте. Измерения профилей протонного пучка использовались в расчетах аксептанса спектрометра для этого эксперимента, а измеренные профили вторичного пучка служили при этом контролем правильности вычислений.

Полное число зарегистрированных антипротонов приведено в Табл. I.

М.ш.	0,4	0,6	0,8
W	0	15	-
AL	2	11	20

В Табл. 2 приведены результаты измерений сечений образования адронов в этом эксперименте.

Таблица 2.

а) Отрицательные частицы.

P (ГэВ/с)	Импульс	$\frac{d^2N}{dP dA} _{p_{min}}$ (барн/ГэВ/с*стер.адр)	
		пионы	антипротоны
0,4	W	$3,58^{+0,57}$	$\leq 3,6 \cdot 10^{-5}$
	AL	$(6,44^{+1,09}) \cdot 10^{-1}$	$(1,9^{+1,3}) \cdot 10^{-5}$
0,6	W	$(4,39^{+0,96})$	$(2,04^{+0,70}) \cdot 10^{-4}$
	AL	$(8,44^{+1,85}) \cdot 10^{-1}$	$(3,50^{+1,33}) \cdot 10^{-5}$
0,8	AL	$(8,15^{+1,48}) \cdot 10^{-1}$	$(7,36^{+1,99}) \cdot 10^{-5}$
1,07	W	$(4,37^{+1,09})$	-
2,0	W	$(6,01^{+1,00})$	-
	AL	$(1,39^{+0,22})$	-

б) Положительные частицы.

P (ГэВ/с)	Импульс	$\frac{d^2N}{dP dA} _{p_{min}}$ (барн/ГэВ/с*стер.адр)	
		пионы	протоны
0,4	W	$2,67^{+0,43}$	$1,41^{+0,23}$
	AL	$(5,35^{+0,96}) \cdot 10^{-1}$	$(1,93^{+0,37}) \cdot 10^{-1}$
0,6	W	$3,24^{+0,88}$	$1,35^{+0,27}$
	AL	$(6,58^{+1,32}) \cdot 10^{-1}$	$(1,14^{+0,19}) \cdot 10^{-1}$
2,0	W	$(7,66^{+1,07})$	-
	AL	$(1,60^{+0,24})$	-

В заключение главы подробно обсуждаются ошибки измеренных сечений образования пионов, протонов и антипротонов; A - зависимость выходов этих адронов и отношения их выходов.

В четвертой главе описывается проведенный на этом же магнитооптическом канале эксперимент по измерению сечений образования π^+ , K^+ , \bar{p} и p при значениях импульса антипротонов больших, чем 0,8 ГэВ/с. При импульсе большем, чем 0,8 ГэВ/с, антипротоны по плотности зерен выделять в фотомульсии практически невозможно, поэтому в области импульсов до 3 ГэВ/с для измерения сечений образования вторичных адронов использовался метод идентификации частиц вторичного пучка по времени пролета. Магнитооптический канал и расположение экспериментальной аппаратуры на нем при проведении этого эксперимента приведено на рис. I.

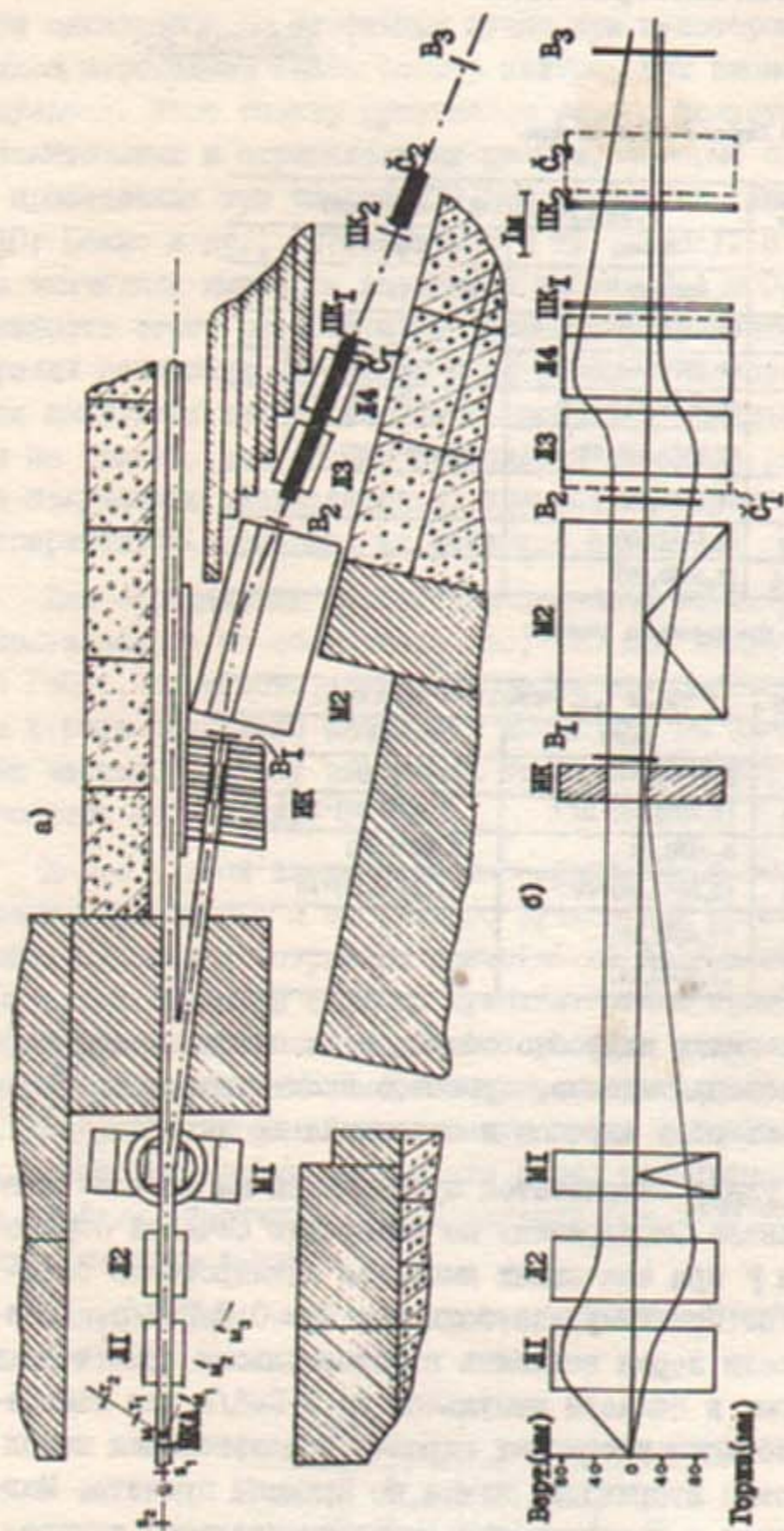


Рис. 1. а) Магнитооптический канал вторичных частиц малых импульсов и расположение экспериментальной аппаратуры на нем в эксперименте с использованием методики разделения частиц по времени пролета. Здесь: Л1-4 - квадрупольные линзы, М1-2 - отклоняющие магниты, М - мишень канала, ИК - коллиматор определяющей диапазон импульсов частиц пучка; В1В2В3, Т1Т2, Р1Р2, М1М2М3 - сцинтилляционные счетчики, С1С2 - пороговые черенковские счетчики, ПК1-2 - пропорциональные камеры, ИКА - ионизационная камера.

б) Огибающая вторичного пучка. Показаны поперечные размеры счетчиков.

В эксперименте измерялось время пролета частиц между счетчиками В1 и В3 для вторичных частиц, прошедших по трассе канала через сцинтилляционные счетчики В1В2В3. Показано, что при разрешении $\Delta t_{1/2} \approx 0,4$ нсек антипротоны надежно отделялись во времяпролетных спектрах от других частиц до импульса 2,5 ГэВ/с без использования пороговых черенковских счетчиков. При больших импульсах компонента легких частиц вторичного пучка (e, μ, π) подавлялась во времяпролетных спектрах включением черенковских счетчиков на антисовпадения со счетчиками В1В2В3. Полученные в работе времяпролетные спектры (Рис. 2) показывают надежное выделение антипротонов во всем интервале импульсов эксперимента.

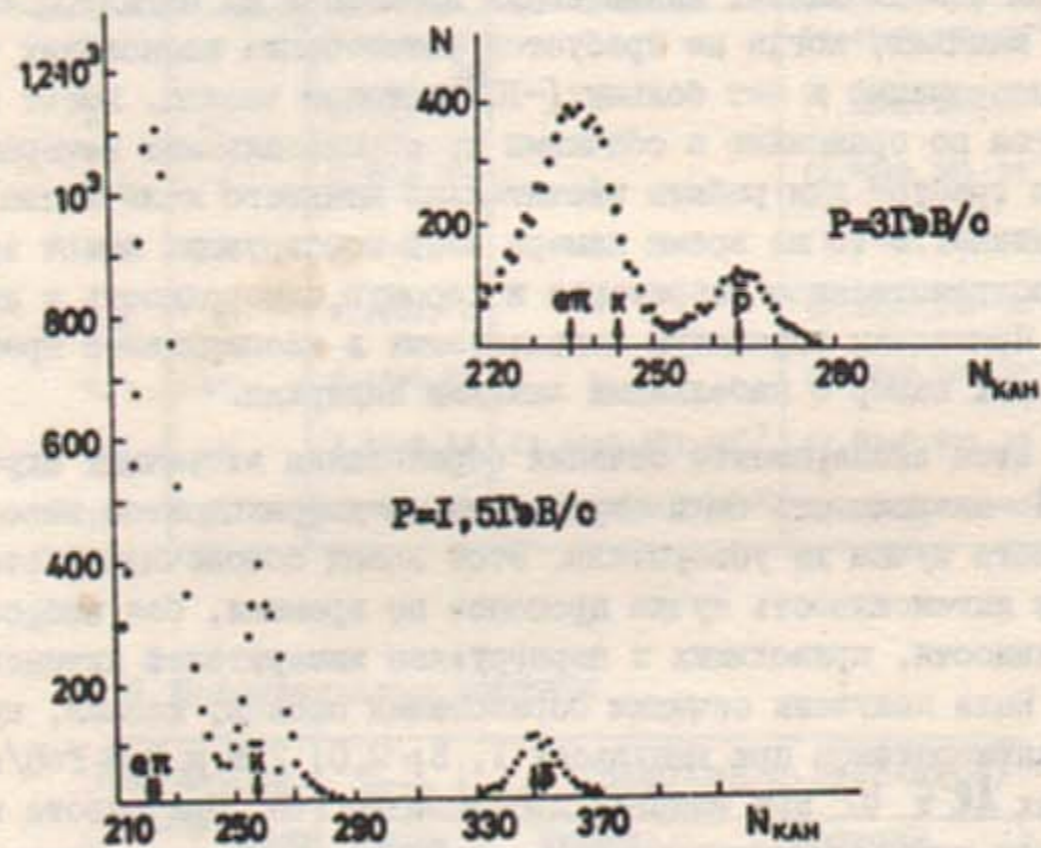


Рис. 2. Времяпролетные спектры вторичных частиц при импульсах 1,5 и 3 ГэВ/с.

При проведении эксперимента использовался дифракционный и медленный вывод протонного пучка из ускорителя ИФВЭ с интенсивностями 10^7 и 10^{10} протонов/оброс, соответственно. Значительное место в этой главе занимает описание методик, использованных при мониторинговании протонного и вторичного пучков;

описываются измерения координатных и угловых распределений частиц пучка, определение интенсивности протонного пучка с помощью ионизационной камеры ИКА и телескопов ТИТ2 и МИМ2М3, процедура калибровки всех измерителей интенсивности протонного пучка. Обосновывается выбор типа детектора для мониторинга протонного пучка и приводится конструкция ионизационной камеры для определения положения, размеров и интенсивности протонного пучка.

Для определения положения и размеров вторичного пучка в конце канала были сконструированы и изготовлены пропорциональные камеры ПК₁₋₂ со съемом информации с катодной плоскости через кабельную линию задержки. Отмечается, что камеры этого типа при исследованиях инклюзивных процессов на магнитооптических каналах, когда не требуется регистрации нескольких частиц одновременно и нет больших ($\sim 10^6$) потоков частиц, имеют преимущества по сравнению с обычными пропорциональными камерами, так как требуют для работы значительно меньшего количества электроники. В то же время камеры этой конструкции имеют высокое пространственное разрешение и хорошую однородность и линейность. Приведены параметры используемых в эксперименте пропорциональных камер с кабельными линиями задержки.

В этом эксперименте сечения образования вторичных адронов и их A -зависимость были определены на дифракционном выводе протонного пучка из ускорителя. Этот вывод обеспечивает стабильную интенсивность пучка протонов по времени, без выбросов интенсивности, приводящих к перегрузкам измерителей интенсивности. Были получены сечения образования пионов, каонов, протонов и антипротонов при импульсах 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 ГэВ/с на ядрах Al и W при энергии протонов 70 ГэВ. При работе на медленном выводе протонного пучка из-за большой нестабильности его интенсивности удалось измерить лишь отношения сечений образования адронов в интервале импульсов от 1,35 до 3 ГэВ/с и их A -зависимость.

Эта глава заканчивается описанием процедуры обработки полученной в эксперименте информации. Рассматриваются вопросы разделения адронов по сортам во времяпролетных спектрах; поправки на взаимодействие с веществом по трассе канала, много-

кратное рассеяние и распад частиц; определение аксептанса спектрометра для условий проведенного эксперимента. Отмечается, что поправочные множители, учитывающие вышеуказанные факторы невелики и наибольшая полная поправка (без фактора, учитывающего распад частиц) не превышала 25-30%. Проводится анализ ошибок эксперимента и результаты измерения сечений образования вторичных адронов в этом эксперименте (Табл.3).

Таблица 3.

а) Отрицательные частицы

Импульс (ГэВ/с)	Мишень	$\frac{d^2\sigma}{d\rho d\Omega} \Big _{\theta=0^\circ}$ (барн/ГэВ/с.стер.ядро)		
		пионы	каоны	антипротоны
3	W	6.65 ± 0.69	-	$(4.45 \pm 0.46) \cdot 10^{-2}$
3	Al	2.21 ± 0.26	-	$(1.42 \pm 0.15) \cdot 10^{-2}$
2.5	W	5.39 ± 0.55	-	$(2.95 \pm 0.30) \cdot 10^{-2}$
2.5	Al	2.03 ± 0.22	-	$(1.04 \pm 0.11) \cdot 10^{-2}$
2.0	W	7.16 ± 0.79	-	$(2.12 \pm 0.24) \cdot 10^{-2}$
2.0	Al	2.14 ± 0.22	-	$(5.65 \pm 0.76) \cdot 10^{-3}$
1.5	W	4.78 ± 0.56	$(1.64 \pm 0.17) \cdot 10^{-1}$	$(7.51 \pm 0.92) \cdot 10^{-3}$
1.5	Al	1.45 ± 0.17	$(5.20 \pm 0.57) \cdot 10^{-2}$	$(2.21 \pm 0.29) \cdot 10^{-3}$

б) Положительные частицы

Импульс (ГэВ/с)	Мишень	$\frac{d^2\sigma}{d\rho d\Omega} \Big _{\theta=0^\circ}$ (барн/ГэВ/с.стер.ядро)		
		пионы	каоны	протоны
3	W	8.55 ± 0.88	-	$(9.23 \pm 1.05) \cdot 10^{-1}$
3	Al	2.93 ± 0.41	-	$(2.52 \pm 0.40) \cdot 10^{-1}$
1.5	W	5.28 ± 0.56	$(3.60 \pm 0.47) \cdot 10^{-1}$	$(9.56 \pm 0.99) \cdot 10^{-1}$
1.5	Al	1.82 ± 0.20	$(8.93 \pm 1.38) \cdot 10^{-2}$	$(1.79 \pm 0.22) \cdot 10^{-1}$

В пятой главе обсуждаются результаты проведенных экспериментов по измерению сечений образования вторичных адронов малых импульсов при энергии 70 ГэВ. Приводятся спектры вторичных антипротонов и заряженных пионов, восстановленные по результатам проведенных экспериментов, а также зависимость сечений от атомного веса ядра-мишени.

Имеющиеся при энергии 70 ГэВ данные по выходу антипротонов на ядерных мишенях (Божко и др., 1979; Барков и др., 1981, 1982) позволяют сделать вывод, что спектр антипротонов на ядрах (см. Рис.3) смещен в область малых импульсов по сравнению с положением спектра в протон-протонных соударениях. Максимум спектра антипротонов в протон-ядерных взаимодействиях при этой энергии находится примерно при импульсе 4 ГэВ/с, а не 6 ГэВ/с, как для протон-протонных соударений. Этот вывод имеет большое значение для проектирования антипротонного источника УНК ИВЭЭ, так как позволяет существенно уменьшить его размеры и стоимость сооружения.

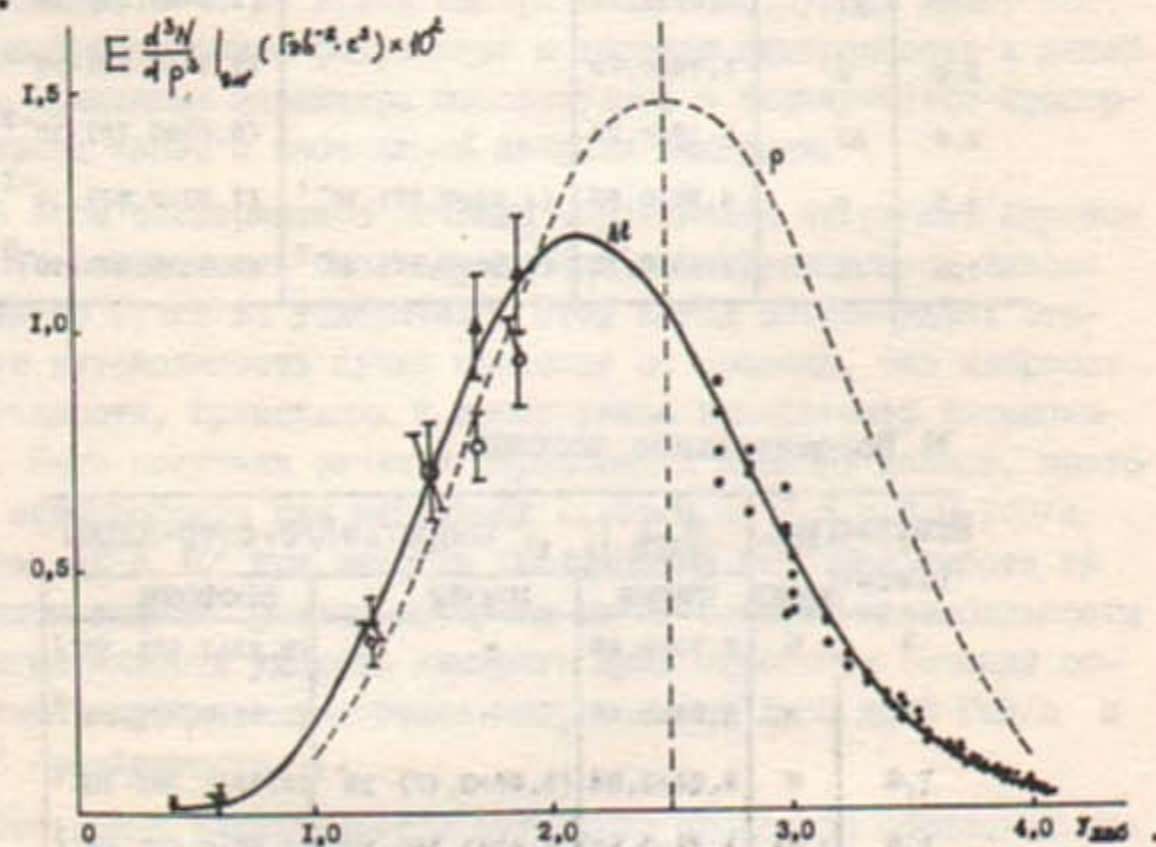


Рис.3. Зависимость выхода антипротонов на ядрах Al и W от быстроты в лабораторной системе при энергии 70 ГэВ. Сплошная линия — параметризация данных на ядре Al , штриховая — предсказание выходов антипротонов на водороде при энергии 70 ГэВ, полученное при параметризации данных для других значений энергии соударения.

В дальнейшем в этой главе описывается процедура параметризации имеющихся в литературе экспериментальных данных по выходу антипротонов в протон-протонных соударениях и систематизации на этой основе экспериментальных данных по выходу антипротонов в протон-ядерных соударениях. Систематизация данных по выходу антипротонов на ядрах проводилась с целью сравнения данных при различных энергиях между собой. Имеющиеся измерения выходов антипротонов на ядрах в интервале энергий соударения от 10 до 400 ГэВ указывают на такое же как при энергии 70 ГэВ поведение и подтверждают, тем самым, выводы о сдвиге спектра антипротонов на ядре в область малых импульсов.

Рассматривается также поведение спектров заряженных пионов на ядрах Al и W , восстановленных по результатам проведенных экспериментов (Барков и др., 1981, 1982) (Рис.4). Поведение спектров пионов в центральной части на ядерных мишенях при энергии 70 ГэВ сравнивается с поведением их в протон-протонных соударениях (Аммосов и др., 1976).

Из сравнения следует, что в области быстрот в лабораторной системе $y > 2,5$, соответствующей вылету пионов в переднюю полусферу в системе центра масс протон-нуклонного взаимодействия при энергии 70 ГэВ, выходы заряженных пионов на ядрах примерно такие же, как и в протон-протонных соударениях. Другой характер имеют пионные спектры в области быстрот $y < 2,5$, соответствующей вылету пионов назад. В этой части спектра выходы на ядрах значительно превышают выходы пионов в протон-протонных соударениях. Обсуждается также различие поведения спектров положительных и отрицательных пионов. В области быстрот $y < 2,5$, как следует из данных проведенных экспериментов, выходы отрицательных пионов больше, чем выходы положительных. Этот факт, очевидно, обусловлен присутствием в ядре нейтронов.

В дальнейшем поведение пионных спектров на ядрах при энергии 70 ГэВ сравнивается с их поведением и при других значениях энергии соударения. Сравнение показало, что спектры пионов на ядрах при различных энергиях в интервале от 10 до 200 ГэВ имеют похожее поведение.

В следующем разделе этой главы обсуждаются полученные данные по зависимости сечений образования вторичных адронов от

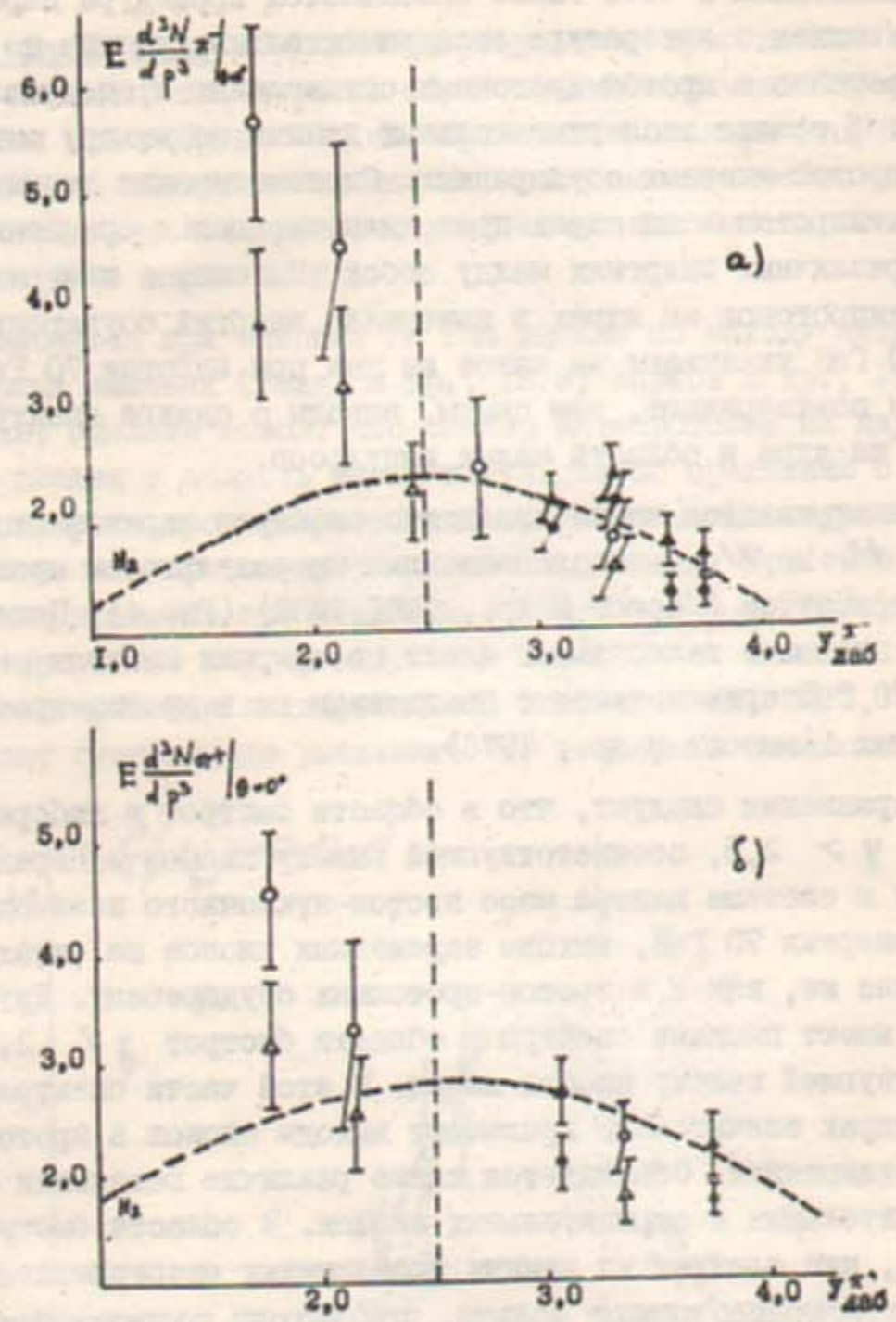


Рис.4. Зависимость выходов отрицательных (а) и положительных (б) пионов на ядрах ^{40}Ca и ^{20}Ne от скорости в лабораторной системе при энергии 70 ГэВ. Результаты работы, выполненные методикой ядерных фотоимпульсов на рисунке обозначены значками Δ — для ^{40}Ca и \circ — для ^{20}Ne , а результаты работы, выполненной с помощью времяпролетной методики — соответственно значками \blacktriangle и \bullet . Выходы пионов в протон-протонных соударениях при этой энергии показаны штриховыми линиями.

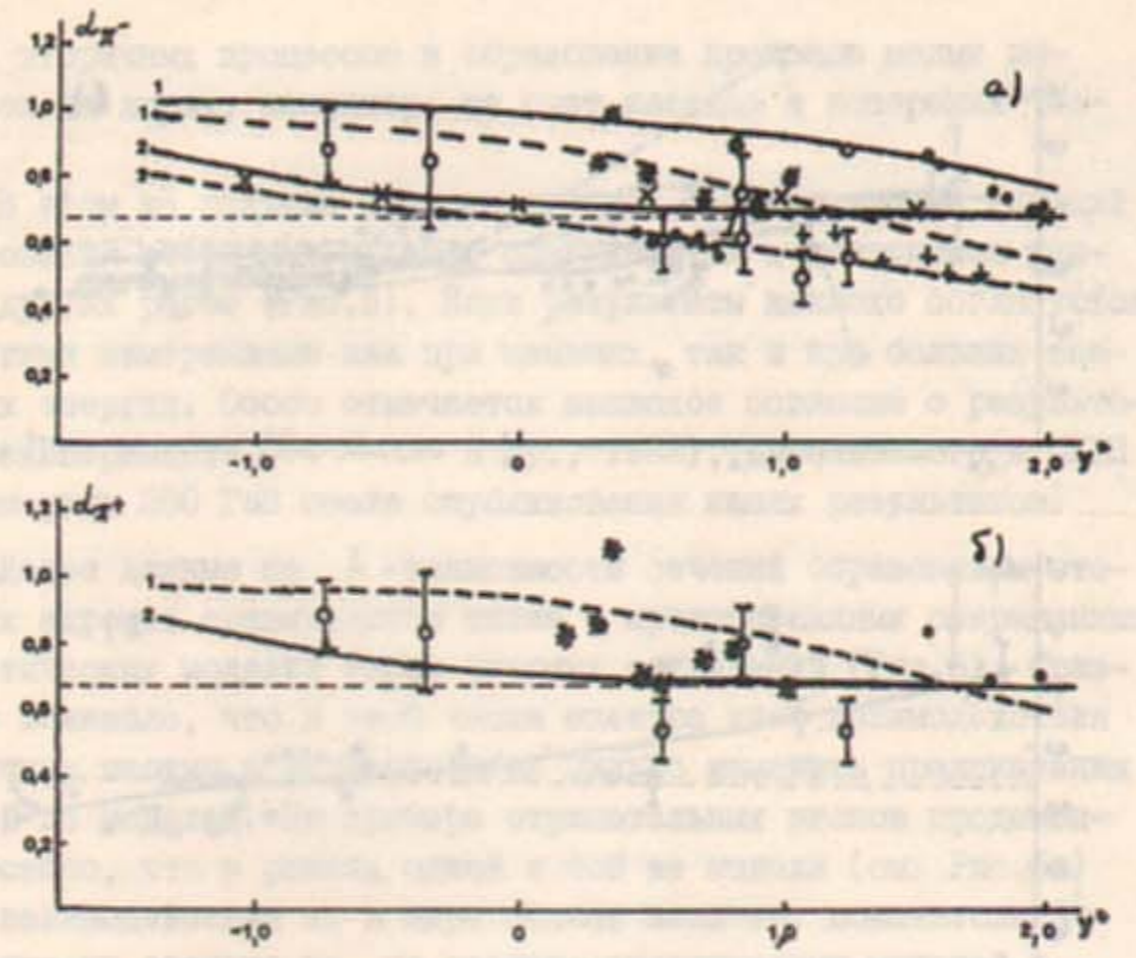


Рис.5а,б. Зависимость показателя A — зависимости сечений образования отрицательных и положительных пионов от скорости в системе центра масс протон-нуклонного взаимодействия. Здесь \circ — данные наших работ, остальные точки определены по имеющимся в литературе измерениям, выполненным при меньших и больших энергиях. Штриховые кривые — расчеты по квазикональной модели, сплошные — по аддитивной кварковой модели, штрих-пунктирная линия — по модели эффективной мишени, а пунктирная — по кластерной модели. Все расчетные кривые частью получены нами, частью взяты из литературы. Цифры (1) и (2) относятся соответственно к расчетам, выполненным без учета и с учетом взаимодействия вторичных адронов в ядре.

атомного веса ядра-мишени A (рис.5). Как обычно, зависимость сечений образования вторичных адронов на ядрах от атомного веса ядра выражается в виде степенной функции, показатель которой d определяется по отношению сечений образования частиц на различных ядрах (^{20}Ne и ^{40}Ca для наших измерений).

Результаты экспериментов показали, что сечения образования пионов (см. Рис.5а,б) в области быстрых в системе центра инерции pN -соударения $y^* > 0$ растут при увеличении A

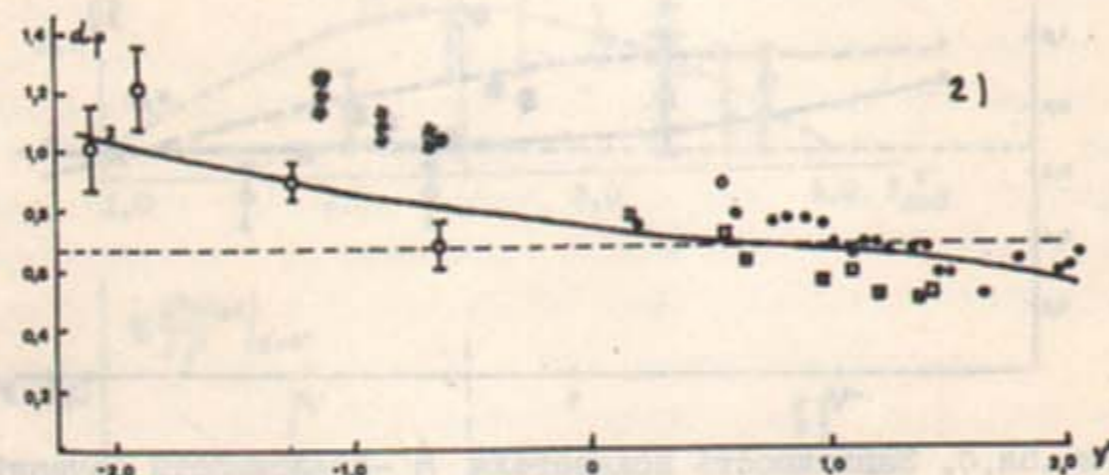
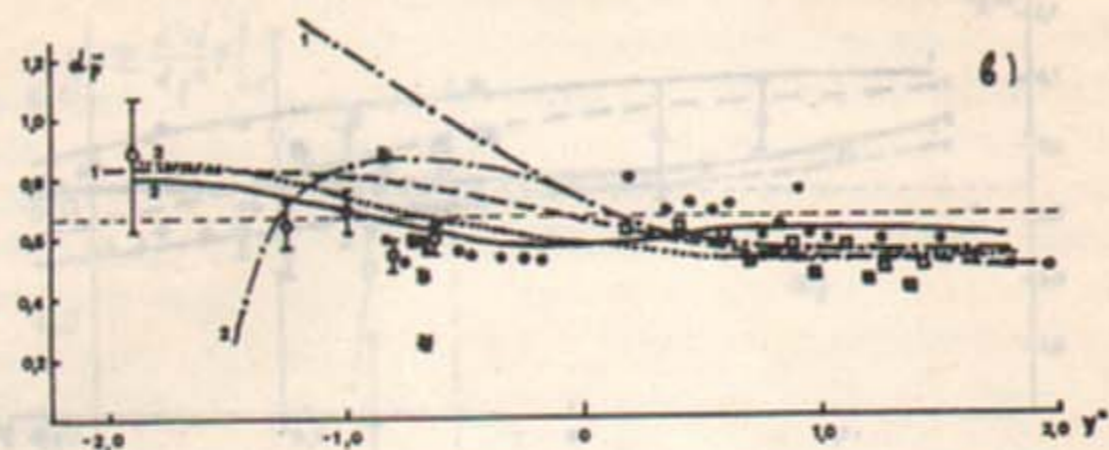


Рис.5в,г. Зависимость показателя α для антипротонов и протонов. Обозначения те же, что и на рис.5а,б.

примерно также, как и полные сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами σ_{inel} (Горин и др., 1973), а в области $Y^* < 0$ — более быстро.

Для антипротонов поведение показателя A -зависимости отличается от его поведения для пионов. Для антипротонов величина α практически во всем диапазоне быстрот не превышает значения $2/3$ и, следовательно, сечения образования антипротонов на ядрах в этой части спектра растут с ростом A не быстрее полного неупругого сечения σ_{inel} .

Для протонов поведение показателя α похоже на поведение этой величины для пионов. Отмечено, что в области самых малых импульсов значение $\alpha > 1$, что означает, что сечения образования протонов при этих импульсах растут быстрее, чем полное число нуклонов в ядре. Это указывает на значительный

вклад вторичных процессов в образование протонов малых импульсов на ядрах, например, за счет каскада и испарения частиц.

В этом же разделе наши измерения A -зависимости сечений образования вторичных адронов сравниваются с имеющимися данными других работ (Рис.5). Наши результаты неплохо согласуются с другими измерениями как при меньших, так и при больших значениях энергии. Особо отмечается неплохое согласие с результатами эксперимента (De Marco и др., 1982), выполненного в ЦЕРН при энергии 200 ГэВ после опубликования наших результатов.

Далее данные по A -зависимости сечений образования вторичных адронов сравниваются также с предсказаниями современных теоретических моделей адрон-ядерных соударений (Рис.5). Сравнение показало, что в этой части спектра учет взаимодействия вторичных частиц в ядре способен сильно изменить предсказания каждой из моделей. На примере отрицательных пионов продемонстрировано, что в рамках одной и той же модели (см. Рис.5а) учет взаимодействия их в ядре меняет величину показателя α примерно на столько же, на сколько предсказания моделей в этой области спектра отличаются друг от друга. Аналогичная ситуация имеет место и для других вторичных адронов. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что варьируя в разумных пределах величину взаимодействия вторичных адронов в ядерном веществе, можно привести предсказания любой из моделей в соответствие с измерениями.

Этот факт затрудняет выбор моделей адрон-ядерных соударений на основе сравнения их предсказаний с экспериментом только в этой части спектра.

В следующем разделе этой главы рассматриваются результаты измерений отношений сечений образования вторичных адронов в области малых импульсов. Обсуждается их зависимость от импульса частиц и атомного веса ядра. Проводится сравнение с предсказаниями теоретических моделей. Показано, что вывод о величине поглощения вторичных адронов в ядре, который можно сделать на основе анализа данных, зависит от выбранной модели взаимодействия протона с ядром. Проводится сравнение с анализом отношения выходов адронов малых импульсов, выполненном в других работах.

Заканчивается пятая глава обсуждением следствий проведенных измерений сечения образования антипротонов малых импульсов для антипротонного источника УНК ИФВЭ. Делается вывод о возможности его существенного упрощения за счет уменьшения импульса антипротонов, захватываемых в источник.

В заключении приводятся основные результаты и выводы проведенной работы.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах автора.

1. Л.М.Барков, М.С.Золоторев, П.К.Лебедев и др. Характеристики канала интенсивных вторичных пучков низких энергий на протонном синхротроне ИФВЭ. - Серпухов, 1979 - IIс. (Препринт/Институт физики высоких энергий: 79-92).
2. В.И.Котов, Р.А.Рзаев, П.К.Лебедев и др. Канал интенсивных пучков вторичных частиц низких энергий на протонном синхротроне ИФВЭ. - Труды 7 Всесоюзного совещ. по ускорит.заряж. частиц. -Дубна, 1981, т:2, с.118-121.
3. Л.М.Барков, В.Г.Васильченко, П.К.Лебедев и др. Образование адронов низких энергий в протон-ядерных столкновениях при энергии 70 ГэВ под нулевым углом. - Ядерная физика, 1982, т.35, с.1186-1193.
Barkov L.M., Datzko V.S., Lebedev P.K. et al. Low energy hadron production at zero angle in proton-nucleus collisions at 70 GeV. - Z. Phys. C - Particles and Fields, 1982, v. 14., p 1-6.
4. Л.М.Барков, М.С.Золоторев, П.К.Лебедев и др. Измерение сечений образования адронов с импульсом до 2 ГэВ/с в протон-ядерных столкновениях при 70 ГэВ. - Ядерная физика, 1983, т.37, с.1232.
Л.М.Барков, М.С.Золоторев, П.К.Лебедев и др. Измерение сечений образования адронов с импульсом до 2 ГэВ/с в протон-ядерных столкновениях при 70 ГэВ. - Новосибирск, 1982, 20с (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР: 82-42).
5. О.В.Жиров, П.К.Лебедев. Об образовании адронов низких энергий в протон-ядерных столкновениях при 70 ГэВ. - Новосибирск, 1982 - 20 с (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР: 82-88).

6. Л.М.Барков, О.В.Жиров, П.К.Лебедев и др. Измерение сечений образования адронов низких энергий в протон-ядерных столкновениях на ускорителе ИФВЭ (Проект эксперимента). -Новосибирск, 1982, 22 с (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР: 82-96).