



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

35/26

3436

1-96-133

На правах рукописи  
УДК 539.171.112  
539.172.12

ЗОЛИН

Леонид Сергеевич

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

НА ПУЧКАХ ПРОТОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ:  
УПРУГАЯ ДИФРАКЦИЯ, КУМУЛЯТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Специальность: 01.04.16 — физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты :

доктор физико-математических наук,  
профессор

Ажгирей  
Леонид Степанович

доктор физико-математических наук,  
профессор

Граменицкий  
Игорь Михайлович

доктор физико-математических наук,  
профессор

Крышкин  
Виктор Иванович

Ведущее научно-исследовательское учреждение –  
Институт физики высоких энергий, г. Серпухов.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1996 г.  
в \_\_\_\_\_ час. на заседании диссертационного совета  
Д-047.01.02 в Лаборатории высоких энергий Объединенного инсти-  
тута ядерных исследований по адресу : г. Дубна, Московской обла-  
сти, Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1996 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

*М.Ф. Лихачев*

М.Ф. Лихачев

Научно-техническая  
библиотека

В диссертации представлен цикл исследований, выполненный на пучках протонов высоких энергий в период с 1970 по 1990гг. Объединяющей методической основой этого цикла было использование метода тонких мишеней на внутреннем пучке ускорителей высоких энергий. Многократная циркуляция пучка через мишень в течение цикла уско-рения предоставляет уникальную возможность исследовать энергетическую зависимость реакций с участием протонов в широком диапазоне энергий – от энергии, близкой к энер-гии инжекции, до номинальной энергии ускорителей. В ходе экспериментов было раз-вита методика использования мишеней трех типов: пленочных, нитеобразных и струй-ных, газовых. Целесообразность применения тонких мишеней на внутренних пучках ускорителей для выполнения определенного класса экспериментов с фиксированными мишенями в настоящее время общепризнана и мишени этого типа широко используются практически на всех эксплуатируемых циклических ускорителях высоких энергий.

Описанные эксперименты посвящены исследованию упругого рассеяния протонов на протонах в области малых переданных импульсов (упругая дифракция) при энер-гиях от 10 до 400 ГэВ и кумулятивному рождению адронов в протон-ядерных взаимо-действиях при энергиях от 15 до 65 ГэВ. Представленные в диссертации физические результаты были получены в экспериментах на двух крупнейших ускорителях протонов – ускорителе Института физики высоких энергий (Серпухов) на 70 Гэв и протонном синхротроне Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (ФНАЛ, США) на 400 ГэВ.

**Актуальность работы.** Изучение упругого рассеяния адронов играет важную роль в построении целостной картины сильных взаимодействий, при этом особое вни-мание привлекают экспериментальные данные по упругому рассеянию при высоких энергиях. Они являются основой, на которой строятся модели теории, описывающие механизм сильных взаимодействий в широкой области пространственно-временного кон-тинума: модели с обменом реджизованными частицами, оптические и квазипотенци-альные модели, кварковые модели и др. Эксперименты по упругому рассеянию предо-ставляют также возможность проверки следствий фундаментальных принципов теории: дисперсионных соотношений, правил сумм, асимптотических соотношений.

В релятивистской квантовой теории поля фундаментальную роль играют такие прин-ципы, как лоренц-инвариантность, унитарность, аналитичность и кроссинг-симметрия. Приложение этих принципов к бинарным реакциям

$$a + b \rightarrow a' + b'$$

позволяет вывести ряд следствий для поведения амплитуды рассеяния адронов при ко-нечных энергиях и в асимптотике ( $s \rightarrow \infty$ ), часть из них может быть экспериментально

проверена при доступных для эксперимента энергиях. Наибольшее внимание при анализе экспериментальных данных по полным и упругим сечениям привлекают следующие три соотношения:

- (i) дисперсионные соотношения, связывающие энергетическое поведение реальной  $ReA_n(s)$  и мнимой  $ImA_n(s)$  частей амплитуды рассеяния, для амплитуды рассеяния вперед  $ReA_n(s, t = 0)$  может быть связана через оптическую теорему с поведением полных сечений  $\sigma_T(s)$ ;
- (ii) ограничение Фруассара на степень роста амплитуды при  $s \rightarrow \infty$

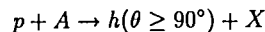
$$|A(s, 0)| \leq const \cdot s \ln^2 s, \quad \sigma_T \leq const \cdot \ln^2 s.$$

- (iii) теорема Померанчука, устанавливающая равенство полных сечений взаимодействия частиц и античастиц при  $s \rightarrow \infty$  и имеющая своим условием ограничение на степень роста отношения реальной части амплитуды к мнимой

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{ReA_n(s, t = 0)}{ImA_n(s, t = 0)} \frac{1}{\ln(s/s_0)} \rightarrow 0.$$

Наиболее детально экспериментальная проверка указанных соотношений выполнена в протон-протонном и пион-протонном рассеянии. Изучение механизма сильных взаимодействий на основе исследования нуклон-нуклонного рассеяния предоставляет ряд возможностей, недоступных в экспериментах с частицами другого типа. Основное из них – широта энергетического диапазона, верхний предел которого в лабораторных условиях определяется возможностями  $pp$ - и  $\bar{p}p$ -коллайдеров. Очень эффективной является методическая возможность использования в экспериментах с фиксированными мишенями многократной циркуляции внутренних пучков протонов (антипротонов) через тонкие мишени. Представленные в диссертации физические результаты по упругой дифракции протонов получены с использованием данной методики.

Другое направление исследований с использованием пучков протонов высоких энергий, которое активно развивалось последние два десятилетия, – это изучение реакций кумулятивного типа



с вылетом быстрых частиц, продуктов фрагментации ядра, в заднюю полусферу. Кинематически эти реакции выделены тем, что кумулятивные частицы не могут быть рождены на свободном покоящемся нуклоне и, следовательно, эти реакции являются специфически ядерными с участием в процессе взаимодействия нескольких сильно скоррелированных нуклонов ядра. В наиболее общем подходе такие образования в ядрах можно воспринимать как флуктуации плотности ядерной материи – “флуктоны” (по предложению Д.И.Блохинцева). К расшифровке механизма образования подобных сгустков адронной материи в ядрах следует, очевидно, подходить с позиций современной теории сильных

взаимодействий, квантовой хромодинамики. Ядра могут служить тем полигоном, где должна проверяться недостроенная часть этой теории – хромодинамика больших расстояний. Актуальность этого направления исследований общепризнана.

Кумулятивные процессы следует отнести к классу глубоко-неупругих реакций с участием ядер. Сечения реакций этого типа очень малы, поэтому соответствующие эксперименты требуют создания условий с высокой светимостью мишеней. Методика тонких внутренних мишеней позволяет обеспечить высокие светимости (порядка  $L \simeq 10^{34}$ ) при небольшом количестве вещества в мишени и относительно невысоком потреблении общей интенсивности внутреннего пучка ускорителей ( $\sim 1\%$ ).

**Цель работы.** При выполнении представленных в диссертации исследований решались следующие задачи. В опытах по упругой дифракции:

- измерение дифференциальных сечений в упругом  $pp$ -рассеянии в области переданных импульсов до  $|t| \simeq 0.15(\text{ГэВ}/c)^2$  с целью изучения энергетической зависимости параметра наклона дифракционного конуса при энергиях до 400 ГэВ и получения данных по полным упругим сечениям;
- измерение дифференциальных сечений  $pp$ -рассеяния в области кулон-ядерной интерференции ( $|t| \simeq 10^{-3}(\text{ГэВ}/c)^2$ ) с целью изучения энергетической зависимости реальной части амплитуды рассеяния при энергиях от 10 до 400 ГэВ;
- сопоставление в рамках дисперсионных соотношений данных по отношению реальной части амплитуды к мнимой с данными по полным сечениям с целью проверки выполнимости дисперсионных соотношений для амплитуды  $pp$ -рассеяния в исследованном диапазоне энергий и прогнозирования поведения полных сечений при более высоких энергиях, недоступных в настоящее время на ускорителях.

В эксперименте по исследованию кумулятивного рождения адронов:

- изучение энергетической и  $A$ -зависимостей кумулятивного образования адронов в интервале энергий от 15 до 65 ГэВ с целью проверки скейлингового поведения кумулятивных сечений в области выхода на режим предельной фрагментации ядер и получения новых по  $A$ -зависимости сечений для кумулятивных частиц разного типа в широком интервале кумулятивных чисел;
- проведение численных расчетов на основе модели ядерного каскада с целью оценки искажений спектров кумулятивных частиц вторичными взаимодействиями в ядрах;
- измерение поляризации кумулятивных протонов с целью изучения роли спиновых эффектов в кумулятивных процессах.

Помимо научных решались следующие методические задачи:

- разработка электронной методики с использованием полупроводниковых детекторов для регистрации частиц отдачи в экспериментах на внутреннем пучке циклических ускорителей;

- разработка методов формирования сверхзвуковой газовой струи в вакууме для создания газовых мишеней, работающих на внутреннем пучке ускорителя;
- создание конструкций пленочных и нитяных мишеней, обеспечивающих выполнение длительных экспозиций на внутреннем пучке ускорителя, и отработка схем стабилизации сброса пучка на тонкие мишени.

**Научная новизна работы.** Новизна полученных результатов была обеспечена тем, что

- в опытах по упругой дифракции измерения проводились в неосвоенном ранее диапазоне энергий с подвижением в область рекордно малых значений переданных импульсов и обладали статистической точностью, превышающей достигнутую в предшествующих экспериментах. Детальное изучение упругой дифракции в области энергий от 10 до 400 ГэВ привело к открытию "Закономерности изменения радиуса сильного взаимодействия протонов при высоких энергиях" (№. 244 в Государственном реестре открытий СССР);
- исследование образования кумулятивных адронов в протон-ядерных взаимодействиях впервые было проведено в области энергий от 15 до 65 ГэВ с одновременной регистрацией выхода частиц во всем указанном диапазоне энергий, что позволило минимизировать систематические погрешности в исследовании энергетической зависимости кумулятивных процессов. Впервые А-зависимость выхода кумулятивных мезонов при углах выхода близких к 180° была подробно изучена в диапазоне кумулятивной переменной  $x_c$  от 0.6 до 1.8, что позволило обнаружить сильную корреляцию степени А-зависимости со значением кумулятивного числа  $x_c$ ;
- впервые в области энергий свыше 1 ГэВ спиновые эффекты в кумулятивном рождении протонов были измерены с точностью, позволяющей дать достоверное заключение об их величине и энергетической и импульсной зависимости.

**Научная и практическая значимость** полученных результатов заключается в том, что они позволили провести экспериментальную проверку правомерности многих теоретических подходов в области физики ядра и элементарных частиц и внесли существенный вклад в экспериментальную базу данных, необходимую для построения законченной теории сильных взаимодействий. Полученные физические результаты и методические разработки, выполненные при развитии метода тонких внутренних мишеней, рекомендуется использовать при планировании новых экспериментов на циклических ускорителях высоких энергий.

**Апробация работы и публикации.** Работы, вошедшие в диссертацию, докладывались на семинарах в ЛВЭ и ЛТФ ОИЯИ, в ИФВЭ (Серпухов), ИТЭФ (Москва) и

ФНАЛ; на проблемных семинарах и рабочих совещаниях: Дубна, 1982г. и Нор-Амберд, 1988г. (Армения); на международных конференциях по физике высоких энергий в Киеве (1970), Чикаго (1972); на Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий в Дубне (1986, 1988, 1990гг.); на Международной конференции по спиновой физике высоких энергий в Бонне (1990), на 2-й Международной конференции по реакциям вблизи порога (1992г., Уппсала, Швеция).

**Объем диссертации.** Диссертация состоит из вступления и двух разделов: раздела 1 ("Упругая дифракция") из 11 глав и раздела 2 ("Кумулятивные процессы") из 7 глав. Работа содержит 315 страниц текста, включая 259 рисунков и списки цитируемой литературы. Список цитируемой литературы раздела 1 содержит 144 наименований и список цитируемой литературы раздела 2 – 117 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во вступлении объяснен принцип изложения материала диссертационной работы, в которой представлено два цикла исследований: по упругой дифракции и кумулятивным процессам. Оба цикла исследований выполнены на внутренних пучках двух протонных ускорителей – ускорителе на 70 ГэВ (У-70) Института физики высоких энергий (г. Серпухов) и ускорителе на 400 ГэВ (У-400) Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (г. Чикаго, США). Методической основой выполненных экспериментов было использование метода тонких внутренних мишеней. Описанию соответствующих методических разработок в диссертации уделено значительное внимание.

**Раздел 1** посвящен описанию постановки и изложению результатов двух экспериментов по исследованию протон-протонного упругого рассеяния в области малых переданных импульсов: (1А) эксперименту по  $pp$ -рассеянию при энергиях от 9.5 до 70 ГэВ, поставленному на ускорителе У-70 ИФВЭ, и (1Б) эксперименту по  $pp$ -рассеянию в области энергий 50-400 ГэВ, выполненному на ускорителе У-400 ФНАЛ.

В главе 1 "Цели и методы изучения упругого рассеяния адронов" кратко изложены теоретические аспекты исследования рассеяния адронов при высоких энергиях и обсуждаются два методических подхода в экспериментах по изучению упругого рассеяния адронов на малые углы при высоких энергиях. Отмечаются особенности метода регистрации частицы отдачи и его преимущества при высоких и сверхвысоких (> 100 ГэВ) энергиях: угол вылета и энергия частицы отдачи при фиксированном переданном 4-х импульсе очень слабо меняются с ростом энергии первичных протонов и область кулон-ядерной интерференции остается свободной от фона неупругих NN-взаимодействий в мишени.



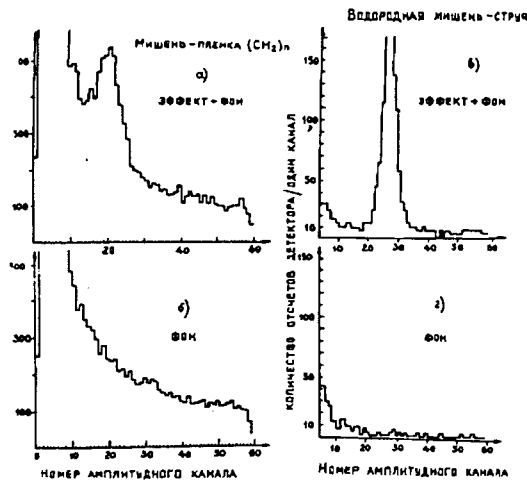


Рис.1. Спектры протонов отдачи от пленочной и газовой мишеней. Применение водородной газовой мишени многократно улучшает отношение "эффект/фон".

Глава 2 посвящена описанию мишеней, используемых в спектрометрах частиц отдачи – пленочных и струйных, газовых. Обсуждаются требования, предъявляемые к мишеням этих типов, условия их эксплуатации и ограничения, связанные с их использованием на внутренних пучках ускорителей. При исследовании  $pp$ -взаимодействия существенным недостатком используемых водородосодержащих пленочных мишеней является наличие в мишени ядер углерода, который является источником фона, ограничивающего точность измерений при  $|t| < 0.01$ . Несмотря на рекордно малую толщину пленок ( $\approx 1 \mu\text{м}$ ) эффект многократного рассеяния на ядрах углерода является дополнительным фактором, ограничивающим точность измерений в области кулоновской интерференции. Проблема создания чисто водородной бесступенчатой мишени, пригодной для использования в вакуумной камере ускорителя, была решена в результате разработки газовой струйной мишени с гелиевым конденсационным насосом специальной конструкции [1,2]. В главе 2 кратко описаны конструкции мишеней, использованных в эксперименте на ускорителе У-70, и их рабочие характеристики. Вид спектров частиц отдачи с использованием мишеней двух типов, пленочной и газовой, показан на рис.1.

В главе 3 описаны детекторы и регистрирующая электроника спектрометра частиц отдачи на ускорителе У-70 ИФВЭ. Обсуждаются характеристики детекторов, особенности их эксплуатации в вакуумной камере ускорителя, описаны способ контроля энергетического разрешения и метод калибровки спектрометрических каналов. С целью одновременного измерения дифференциальных сечений в зависимости от нескольких кинематических переменных была создана многопараметровая спектрометрическая уста-

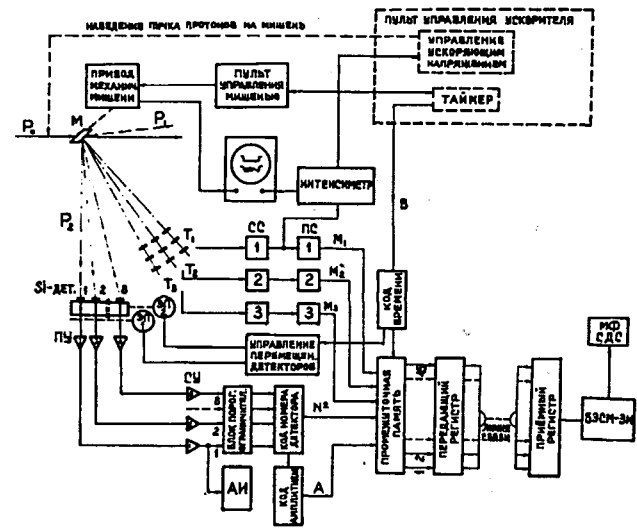


Рис.2. Блок-схема аппаратуры эксперимента на ускорителе У-70.

новка (МПСУ), обеспечившая возможность регистрации энергетических спектров частиц отдачи в каждом цикле ускорения одновременно в 8-ми угловых точках и 64-х интервалах энергии первичных протонов. Созданная установка, работающая на линии с ЭВМ, была одним из первых отечественных on-line спектрометров, разработанных для целей физики высоких энергий [2,3]. Связь с ЭВМ обеспечивала, помимо накопления рабочей информации, автоматический контроль состояния аппаратуры, проведение калибровочных процедур и выборочную контрольную обработку данных. Общая блок-схема аппаратуры эксперимента на ускорителе ИФВЭ представлена на рис.2. Важным условием обеспечения оптимальных условий регистрации и защиты пленочных мишеней от быстрого разрушения была стабилизация уровня сброса пучка на мишень. Эта задача была решена путем разработки схемы обратной связи для управления радиальным положением пучка в камере ускорителя.

В главе 4 рассмотрены вопросы обработки экспериментальных данных. Анализ данных по упругому  $pp$ -рассеянию проводился на основе интерференционной формулы Бете для бесспиновых амплитуд

$$\frac{d\sigma}{dt} = [|A_c|^2 + |A_n|^2(1 + \alpha^2) + 2A_c \cdot A_n(\alpha + \delta)] \cdot \exp(bt), \quad (1)$$

где  $\alpha = A_{nR}/A_{nI}$  – отношение реальной части ядерной амплитуды к мнимой,  $\delta$  – характеризует сдвиг фаз кулоновской  $A_c$  и ядерной  $A_n$  амплитуд. Согласно Бете  $\delta = 2n \cdot \ln(\phi/\theta) = 2 \cdot \frac{1}{137\beta_n} \ln(\frac{1.06}{\theta \cdot k \cdot a})$ , здесь  $\beta_n$  – скорость протона в л.с.;  $k$  – волновой век-

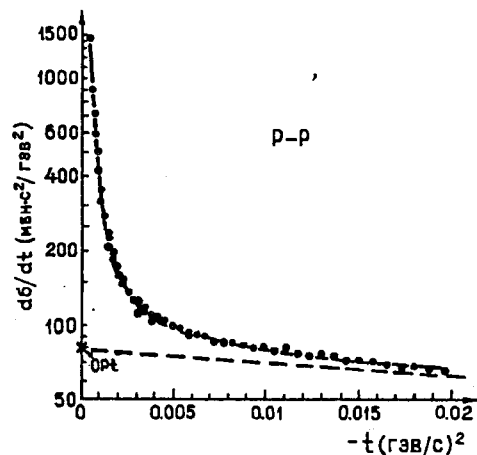


Рис.3. Дифференциальное сечение  $pp$ -рассеяния при энергии 70 ГэВ.

тор в с.д.м.;  $a$  - радиус области сильного взаимодействия. Кулоновская амплитуда  $A_c$  - величина строго вычисляемая, мнимая часть ядерной амплитуды  $A_{nI}$  связана с полным сечением оптической теоремой

$$A_{nI}(s, t = 0) = \sigma_T / (4\hbar\sqrt{\pi}). \quad (2)$$

Ядерный и электромагнитный формфакторы нуклона аппроксимируются экспонентой  $F_c = F_n = \exp(bt/2)$ .

Экспериментально измеряемыми в нашем опыте были две  $s$ -зависимые величины: параметр  $\alpha$  и параметр наклона дифракционного конуса  $b$ , характеризующий  $t$ -зависимость амплитуды рассеяния. Измерение параметра  $b$  было выполнено в интервале переданных импульсов  $0.01 \leq |t| \leq 0.12$  на первом этапе эксперимента с использованием пленочной мишени [4]. Для получения отношения реальной части амплитуды к мнимой  $\alpha$  были использованы измерения, проведенные с водородной струйной мишенью в более узком угловом интервале с приближением к минимально малым значениям  $|t| \simeq 0.001$ . Зависимость дифференциальных сечений от  $t$  была вычислена для восьми значений энергии первичных протонов от 9.4 до 70 ГэВ. Для каждого энергетического интервала значение сечений было измерено в  $\sim 70 - 80$  угловых точках со статистической ошибкой в каждой точке  $\sim 3 - 4\%$  (рис.3). Для обработки экспериментальных данных был разработан пакет фортранных программ COINT, который обеспечивал скорость обработки  $\sim 1000$  соб./мин. на ЭВМ типа БЭСМ-6.

В главе 5 приведены результаты эксперимента при энергиях 10-70 ГэВ, проводится сопоставление с данными предшествующих экспериментов и обсуждается их соответствие теоретическим предсказаниям, основанным на дисперсионных соотношениях [5,6].

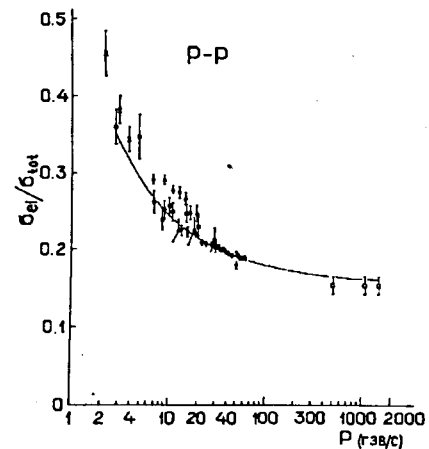


Рис.4. Экспериментальные данные по полному сечению упругого  $pp$ -рассеяния свыше 2 ГэВ.  $\bullet$  - наши результаты, остальные точки - данные предшествующих измерений.

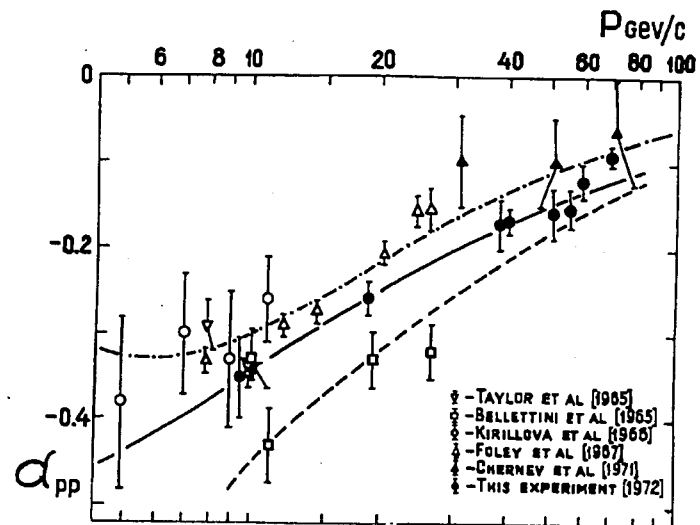


Рис.5. Экспериментальные данные для отношения реальной части амплитуды к мнимой  $\alpha_{pp}$  в интервале импульсов протонов от 5 до 70 ГэВ,  $\bullet$  - результаты данного эксперимента. Сплошная кривая из [4], штрих-пунктирная - расчет Зодинга (P.Soding, Phys.Lett.8,283,1964).

На основе измеренных дифференциальных сечений и полученных данных по реальной части амплитуды упругого рассеяния были вычислены полные упругие  $pp$ -сечения с точностью, превосходящей результаты большинства предшествующих экспериментов. Соответствующие данные показаны на рис.4. Если полное сечение  $pp$ -взаимодействий при серпуховских энергиях меняется незначительно, переходя от режима падения к режиму роста, то полное упругое сечение продолжает монотонно падать, отражая как факт сужения дифракционного конуса так значительное уменьшение по абсолютной величине реальной части амплитуды рассеяния.

Основной результат эксперимента в Серпухове, зависимость параметра  $\alpha = A_{nR}/A_{nI}$  от энергии, показан на рис.5. В интервале импульсов первичных протонов от 9.4 до 70 ГэВ/с абсолютная величина  $\alpha$  монотонно уменьшается от значения 0.35 до 0.09. Сопоставление поведения реальной части амплитуды  $pp$ -рассеяния с расчетами по дисперсионным соотношениям и предсказаниями аксиоматики показало, что в области энергий до 70 ГэВ эксперимент и теория дают согласованную картину для нуклон-нуклонного рассеяния. Было снято противоречие, которое дискутировалось в связи с аномальным поведением данных группы ЦЕРН (см. точки "Bellettini et al." на рис.5).

Главы 6-10 посвящены описанию исследования упругой дифракции протонов при энергиях до 400 ГэВ, продолженному ускорителе ФНАЛ в рамках эксперимента E-36 [7,8]. Схематическое изображение ускорительного комплекса представлено на рис.6. Постановка эксперимента E-36 была основана на методических и технических разработках, выполненных при проведении предшествующего эксперимента на У-70. Однако весь комплекс аппаратуры был существенно модернизирован и, в частности, изготовлена струйная мишень новой конструкции (рис.7). В диссертации подробно изложены методические аспекты выполнения эксперимента E-36, чтобы отразить тот дополнительный методический опыт постановки экспериментов по упругой дифракции, который был приобретен в ФНАЛ.

В главе 6 дано описание техники эксперимента E-36, включая описание конструкций и характеристик роторной и газовой мишеней, детекторной сборки, калибровочных процедур. Обсуждаются фоновые условия на ускорителе У-400 и способы учета и вычитания фона. Отношение эффект/фон при работе с водородной газовой мишенью иллюстрируется спектрами на рис.8. Кратко описана электронная логика съема данных и организация приема на ЭВМ PDP-11. Обсуждаются источники систематических ошибок: мертвое время аппаратуры; эффективность детекторов; искажения спектров, связанные со вкладом неупругого канала; геометрические погрешности; влияние рассеянных магнитных полей; неточность энергетической калибровки детекторных каналов.

Глава 7 посвящена анализу данных по дифракционному пику и определению па-

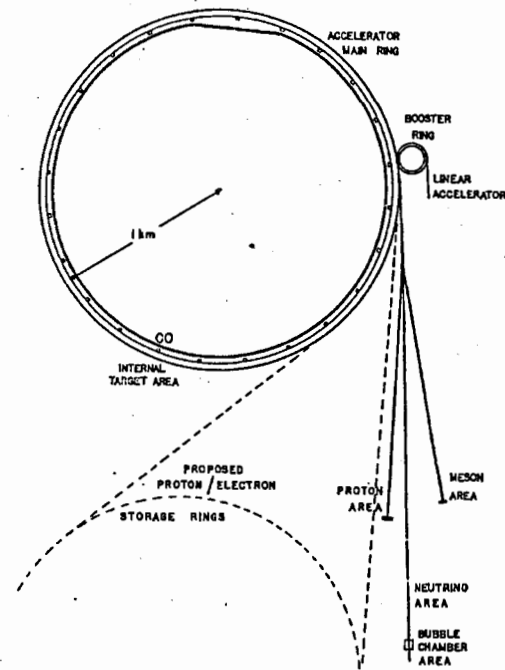


Рис.6. Ускорительный комплекс ФНАЛ (1972г.). На прямолинейном промежутке CO располагалась мишень и оборудование эксперимента E-36 (Internal Target Area).

раметра наклона дифракционного конуса. При накоплении данных по дифракционному пику использовалась пленочная роторная мишень. Протоны отдачи регистрировались вне области кулоновской интерференции при значениях передач  $|t|$  от 0.01 до 0.18 (ГэВ/с)<sup>2</sup> (рис.9), где эффект многократного рассеяния и углеродный фон не ухудшали значительно условия выделения упругого пика. В этом интервале  $t$  наиболее существенными видами коррекции были поправки на ядерные взаимодействия в кремниевых детекторах (до 10%) и неупругие  $pp$ -взаимодействия в мишени. В интервале энергий от 50 до 400 ГэВ угловой сектор для протонов отдачи, свободный от пиков дифракционного возбуждения протона, сужается по мере увеличения энергии. Поэтому вычитание вклада неупругих пиков от реакции  $pp \rightarrow N^*(\Delta)p$  в указанном интервале  $t$  становится необходимой в области энергий свыше 150 ГэВ, где величина поправок превышает 1%.

Измеренная энергетическая зависимость параметра наклона  $b(s)$  показана на рис.10. совместно с данными других экспериментов. Область данных, полученных в ФНАЛ, аппроксимируется линейной зависимостью

$$b(s) = b_0 + 1\alpha' \ln s = (8.23 \pm 0.27) + 2(0.278 \pm 0.024) \ln s (\text{ГэВ/с})^{-2}. \quad (3)$$

Подобное линейное поведение предсказывается Редже моделью с одиночным полюсом.

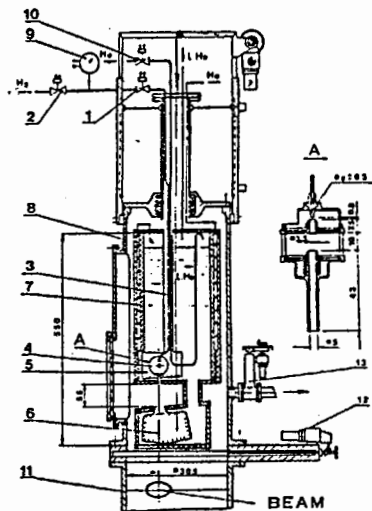


Рис.7. Газовая струйная мишень эксперимента E-36 в ФНАЛ: 4 - сопло и система коллиматоров; 5,6 - верхний и нижний конденсационные крионасосы; 11 - камера ускорителя; 12 - вакуумный затвор (мишень выведена из камеры ускорителя в шлюз над затвором).

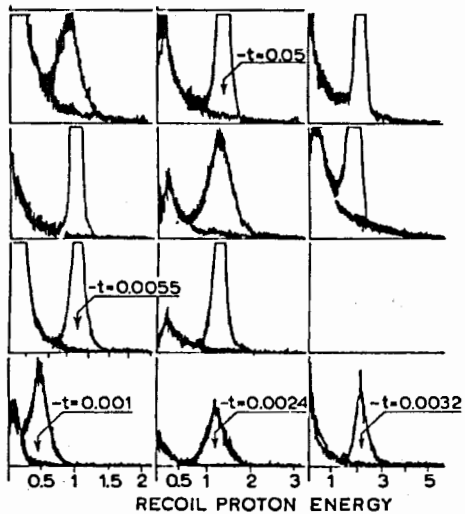


Рис.8. E -спектры частиц отдачи от водородной газовой мишени, рабочие и фоновые спектры наложены друг на друга. Указаны значения 4-х импульса  $t$ , соответствующие центру упругих пиков.

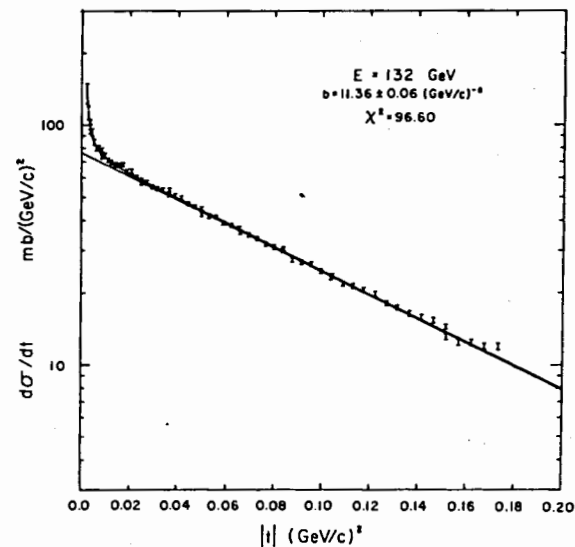


Рис.9. Дифференциальное сечение при энергии 132 ГэВ из данных по параметру наклона дифракционного конуса.

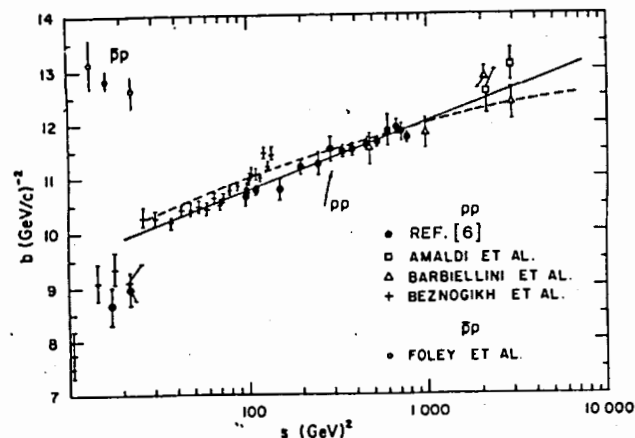


Рис.10. Параметр наклона дифракционного пика  $b(s)$  для  $|t| < 0.18(\text{ГэВ}/c)^2$  при энергиях свыше  $s=10 \text{ ГэВ}^2$ . +, ● - данные экспериментов в Серпухове [5] и ФНАЛ [7]. Сплошная кривая - Редже фит с включением только Померона, штриховая кривая - с дополнительным включением  $f$  и  $\omega$  траекторий.



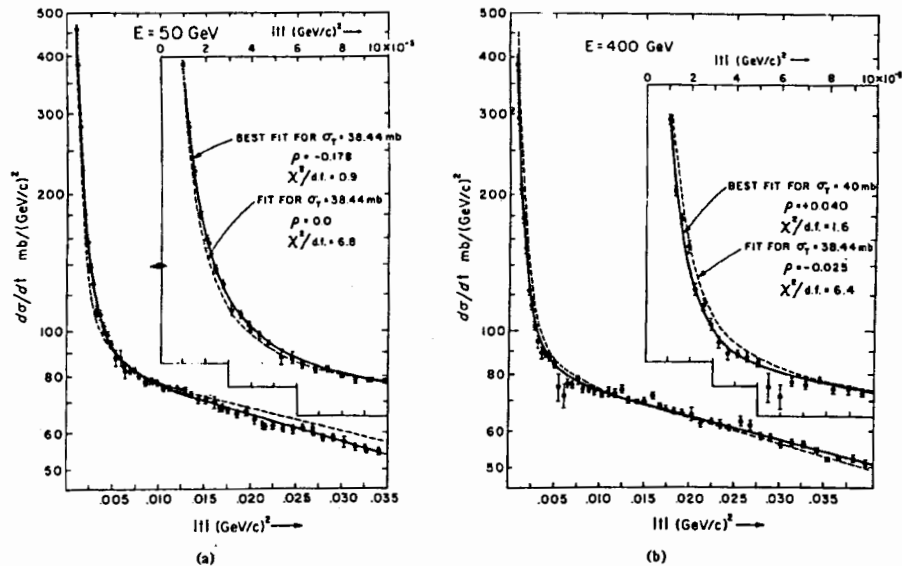


Рис.11. Дифференциальные сечения упругого  $pp$ -рассеяния при энергиях 50 и 400 ГэВ. Сплошные кривые результат наилучшего фита, штриховые – результаты фита с фиксированными  $\rho = 0.0$  и  $\rho = -0.025$ .

Полее подробно наблюдаемое поведение  $b(s)$  обсуждается в рамках трех групп моделей: моделей, основанных на теории полюсов Редже; моделей, специально развитых для описания параметра  $b$ , и общих моделей упругого рассеяния.

Глава 8 посвящена анализу данных по реальной части амплитуды упругого  $pp$ -рассеяния при энергиях 50-400 ГэВ. Алгоритм обработки данных по реальной части в основе своей опирался на программные разработки, выполненные при проведении эксперимента с газовой мишенью в Серпухове. Существенные дополнения были сделаны в связи со спецификой эксперимента в ФНАЛ. Одно из них связано с усилением вклада фоновой компоненты, обусловленной возбуждением изобарных состояний в неупругом канале  $pp$ -взаимодействий. Были апробированы дополнительные методики вычитания фона с тем, чтобы довести точность определения отношения  $\rho$  реальной части амплитуды к мнимой до 1%.

Измерения дифференциальных сечений с водородной струйной мишенью выполнялись в относительной шкале из-за сложности определения интегральной светимости области взаимодействия протонного пучка с нестационарным во времени газовым потоком. Для привязки сечений к абсолютной шкале использовалась оптическая теорема (2). При фитировании дифференциальных сечений интерференционной формулой Бете (1)

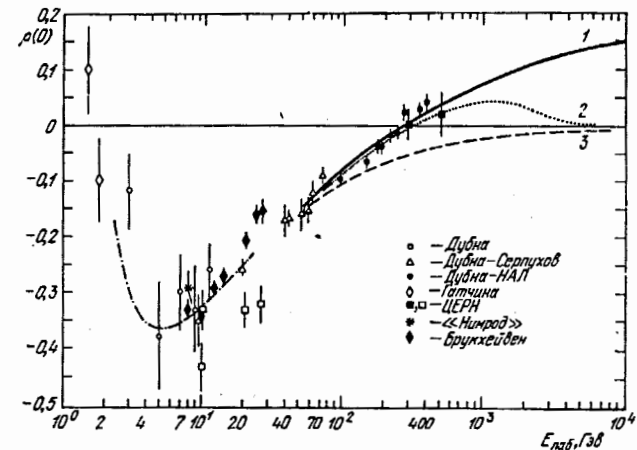


Рис.12. Отношение реальной части амплитуды к мнимой  $\rho(s, t = 0)$  в упругом  $pp$ -рассеянии в зависимости от энергии протонов.  $\bullet$  и  $\Delta$  отмечают наши данные при энергиях от 9.4 до 400 ГэВ.

коэффициент абсолютной нормировки и отношение  $\rho$  использовались в качестве свободных параметров. Параметр наклона  $b$  аппроксимировался найденным нами соотношением (3). На рис.11 результаты наилучших фитов для двух энергий 50 и 400 ГэВ показаны сплошными линиями.

На рис.12 показаны результаты наших измерений  $\rho$  в Серпухове и ФНАЛ совместно с данными других экспериментов, выполненных в области энергий до 500 ГэВ. Полученные результаты сопоставлены с расчетами по дисперсионным соотношениям. Кривые, приведенные на рис.12, представляют результаты дисперсионных расчетов при различных предположениях о поведении полных сечений: 1- $\sigma_T(pp)$  и  $\sigma_T(\bar{p}p)$  растут с энергией как  $\ln^2(s/122)$  до  $E_\infty$ ; 2- $\sigma_T(pp)$  становится постоянным (44.2 мбн) при  $E \geq 2000$  ГэВ; 3- $\sigma_T(pp)$  постоянно (38 мбн) при  $E \geq 120$  ГэВ (во всех случаях допускалось, что  $\sigma_T(pp)$  и  $\sigma_T(\bar{p}p)$  сближаются со скоростью  $E^{-0.602}$ ). Сопоставление с дисперсионными кривыми позволяет заключить, что по крайней мере до  $E=2000$  ГэВ, прекращение роста полных  $pp$ -сечений исключено. Успешная проверка дисперсионных соотношений на основе полученных данных показывает их выполнимость в изученной области энергий и подтверждает обоснованность основных аксиом квантовой теории поля.

В главе 9 приводятся данные по полным упругим сечениям  $\sigma_{el}^{pp}$ , полученные на основе измеренных дифференциальных сечений упругого  $pp$ -рассеяния. Отмечается, что в интервале энергий от 100 до 300 ГэВ отношение  $\sigma_{el}^{pp}/\sigma_T^{pp}$  приблизительно постоянно и равно 0.18, что значительно ниже величины 0.5, соответствующей случаю рассеяния на протоне, как абсолютно черном диске. Полученное отношение  $\sigma_{el}^{pp}/\sigma_T^{pp}$  близко

к пределу Ван Гофа (0.185), который соответствует гауссообразному абсорбционному профилю протона.

Глава 10 посвящена теоретической интерпретации данных по упругой дифракции в рамках асимптотических ограничений квантовой теории поля для амплитуд бинарных реакций, обсуждению обобщенных моделей упругого рассеяния и структуры протона в рамках этих моделей. Рассмотрено развитие модельных подходов к описанию амплитуды NN-рассеяния в эпоху  $\bar{p}p$ -коллайдеров и обсуждаются в свете этих моделей последние данные по упругой дифракции, полученные на коллайдерах ЦЕРН и ФНАЛ.

В главе 11 перечислены основные результаты исследования упругой дифракции протонов при энергиях от 10 до 400 ГэВ, полученные в работах, на основе которых написана диссертация.

Раздел 1 завершается списком литературы, цитируемой в главах 1-10 этого раздела.

Раздел 2 посвящен исследованию образования кумулятивных адронов в протон-ядерных взаимодействиях при энергиях от 15 до 65 ГэВ. В главе 1 кратко обсуждаются теоретические аспекты исследования кумулятивного эффекта в ядрах. В свете развития теории ядра кумулятивные процессы интересны тем, что содержат информацию о структуре ядер при малых междуклонных расстояниях, а с позиций теории сильных взаимодействий, квантовой хромодинамики, они несут полезную информацию для разработки хромодинамики больших расстояний.

Кумулятивные реакции относятся к классу глубоко-неупругих реакций на ядрах и имеют малые сечения в диапазоне от 1 мбн до  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  мбн. Получение статистически хорошо обеспеченных данных в этой области требует проведения длительных сеансов на пучках высоких энергий и выполнение подобных исследований на выведенных пучках является очень дорогостоящим мероприятием. В этом плане постановка эксперимента на внутреннем пучке ускорителя с использованием метода тонких мишеней является очень рациональным решением, позволяя обеспечить продолжительные экспозиции с потреблением незначительной доли интенсивности ускоренного пучка и проводить измерение сечений одновременно в широком интервале энергий. Согласно кварковым моделям кумулятивных реакций их механизм интересно изучать при энергиях, когда кварковые степени свободы должны безусловно проявлять себя в ядрах, т.е. при импульсах (на конститuent частицы-снаряда) выше порога конфайнмента кварков ( $> 0.5 \text{ ГэВ}/c$ ). Этот порог для протонных пучков соответствует 3-4 ГэВ/с. Таким образом энергии свыше 15 ГэВ, при которых выполнены наши исследования, заведомо обеспечивали выполнение этого критерия.

В главах 2 и 3 изложены методические вопросы, связанные с проведением экспе-

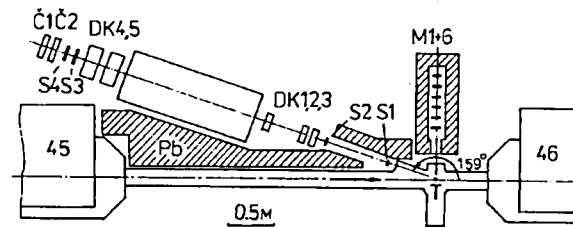


Рис.13. Спектрометр кумулятивных адронов в кольцевом зале ускорителя У-70. М1-6, S1-4, С1-2 –мониторные(М), триггерные(S) и черенковские(С) счетчики; ДК1-5 – дрейфовые камеры; Т – мишень на прямолинейном участке камеры между блоками 45 и 46 магнита ускорителя.

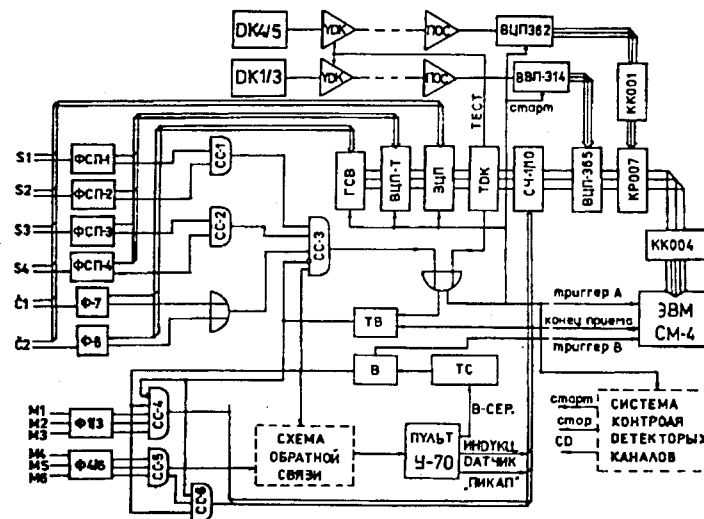


Рис.14. Блок-схема электроники спектрометра СКА.

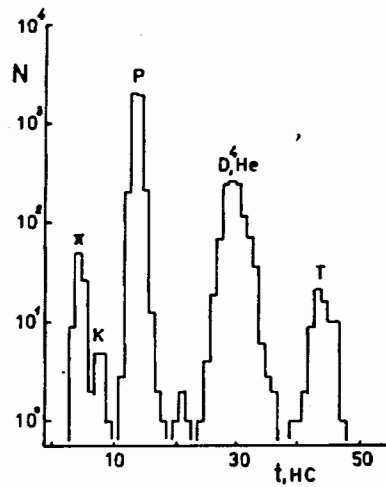


Рис.15. Времяпролетный спектр для частиц с импульсом 550 МэВ/с.

римента на ускорителе У-70 ИФВЭ. Измерения были выполнены на магнитном спектрометре кумулятивных адронов (СКА) [12,13], в котором в качестве трековых детекторов использовались дрейфовые камеры (рис.13). Для идентификации частиц использовалась техника времени пролета и амплитудный анализ сигналов черенковских счетчиков [11].

В главе 2 подробно описана конструкция спектрометра: детекторы, логическая и регистрирующая электроника (рис.14), системы контроля детекторных каналов и управления режимом сброса пучка на мишень, система сбора данных на ЭВМ. Обработка записанной информации проводилась в три этапа (Гл.3). На первом этапе выполнялась наиболее времяемкая часть анализа – геометрическая реконструкция событий. После трековой реконструкции данные о событиях переносились на вторичные ST-ленты, алгоритм последующей обработки которых включал следующий набор заданий:

- сортировка событий по интервалам энергии первичных протонов E;
- накопление мониторных сумм по отдельным E-интервалам с учетом доли браковки событий по отдельным критериям;
- получение 3-мерных ЕРМ-массивов (энергия, импульс и масса частицы) для полезных событий, удовлетворяющих критериям отбора;
- вычисление инвариантных дифференциальных сечений.

Основой анализа данных был времяпролетный и импульсный анализ. В качестве примера на рис.15 показан времяпролетный спектр для положительно заряженных частиц с импульсом  $(500 \pm 25)$  МэВ/с. На рис.16 показана корреляционная матрица "импульс-время пролета" для положительных частиц, полученная при интеграле поля в анализирующем магните  $B \cdot l = 0.3T \cdot м$ . Полученные инвариантные сечения и интегральные

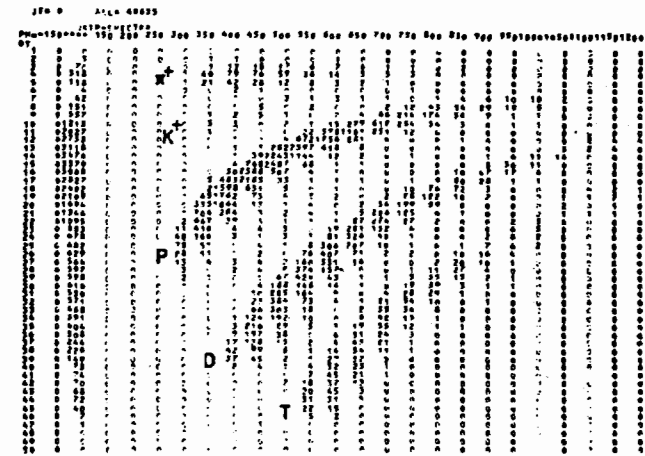


Рис.16. Корреляционная матрица "импульс-время пролета".

ЕРМ-распределения заносились на DST-ленты суммирования данных отдельных серий измерений с различными ядрами мишени. Окончательные результаты по инвариантным сечениям рождения адронов данного типа на различных ядрах получались путем объединения данных отдельных рангов с учетом их статистических весов. В программе DST-обработки были заложены процедуры фитирования сечений для представления их в параметризованной форме по избранным кинематическим переменным.

Для контроля алгоритма обработки данных и правильности учета различных поправок была создана программа воспроизведения наблюдаемых физических распределений путем Монте Карло розыгрыша событий прохождения частиц через спектрометр [10]. Это страховало процесс обработки от программных ошибок и обеспечивало количественную оценку обоснованности величины коррекций на фоновые вклады, на многократное рассеяние, на временное и координатное разрешение детекторов и т.д.

Экспериментальные результаты по сечениям образования кумулятивных пионов и каонов при энергиях 15-65 ГэВ [15,17,20-24], представлены в главе 4. Первые эксперименты по изучению кумулятивных реакций выявили наиболее характерную особенность кумулятивных спектров: они хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью от кинетической энергии частиц,  $\exp(-T/T_0)$ , при этом температура спектров,  $T_0$ , определяющая их наклон, слабо зависит от энергии и типа частиц-снарядов и атомного номера, A, фрагментирующего ядра. Подобный "ядерный" скейлинг носит приближенный характер при энергиях до 10 ГэВ, однако уже при энергиях свыше 3-5 ГэВ наблюдается приближение к асимптотическому поведению со стабильными характеристиками фрагментации ядер. В энергетической шкале это соответствует наступлению режима

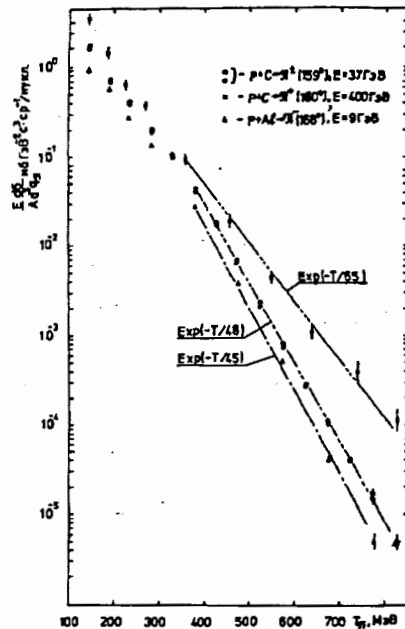


Рис.17. Сравнение инвариантных сечений в реакциях:  $p + Al \rightarrow \pi^-(168^\circ) + X$  при  $E=8.9$  ГэВ ( $\Delta$  -Дубна),  $p + C \rightarrow \pi^{\pm}(159^\circ) + X$  при  $E=37$  ГэВ ( $\bullet, \circ$  - наши данные) и  $p + C \rightarrow \pi^+(160^\circ) + X$  при  $E=400$  ГэВ ( $\nabla$  -ФНАЛ). Соответствующие наклоны экспонент равны  $T_0 = 45, 48$  и  $65$  МэВ.

предельной фрагментации ядер согласно гипотезе Чу и Янга (Phys.Rev. 188(1969) 2159). Скейлинговое поведение сечений наиболее наглядно проявляется при их представлении в соответствующей масштабной переменной. В качестве масштабной переменной при представлении кумулятивных спектров широко используется инвариантная безразмерная переменная  $x_c$ , численно равная минимальной массе мишени в единицах массы нуклона, необходимой для рождения частицы с данным импульсом. По определению, кумулятивной области соответствует  $x_c > 1$ . При рождении пионов с импульсом  $q_\pi$  в пучке частиц с энергией  $E_0$

$$x_c = \alpha / (1 - \frac{E_\pi + m_\pi + m_N}{E_0}), \quad (4)$$

где  $\alpha = (E_\pi - q_\pi^L) / E_0$  - переменная светового фронта. В соответствии с (4) при  $E_0 \gg E_\pi + m_N$   $x_c \simeq \alpha$ , в области энергий нашего эксперимента ( $E \geq 15$  ГэВ)  $x_c$  превышает  $\alpha$  не более, чем на 10%. В числе основных задач при выполнении эксперимента на серпуховском ускорителе были:

- подробное исследование E-зависимости сечений образования кумулятивных фраг-

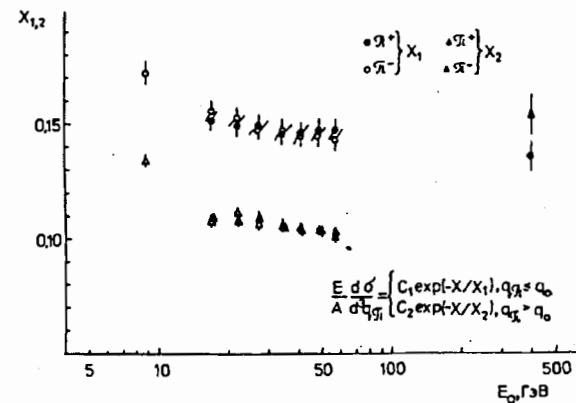


Рис.18. Зависимость параметра наклона экспонент в кумулятивной  $x_2$  ( $x_c > 1, q_\pi > q_0 = 450$  МэВ/с) и докумулятивной  $x_1$  ( $x_c \leq 1$ ) частях спектра (точки при 9 ГэВ - данные группы ДИСК, Дубна).

ментов при энергии свыше 10 ГэВ с целью выяснения степени приближения к скейлинговому поведению;

- получение точных данных по A-зависимости сечений, включая область  $x_c > 1.3$ , где они практически отсутствовали.

Спектры  $\pi^\pm$  -мезонов были изучены при импульсах от 250 до 1000 МэВ/с в 7-ми интервалах энергии первичных протонов от 15 до 65 ГэВ на 6-ти типах ядер Be, C, Al, Ti, Mo, W [17]. Суммарная ошибка статистического характера при вычислении сечений  $\simeq 3\%$ . Неточность абсолютной нормировки сечений, связанная с ошибкой калибровки мониторов и ошибкой импульсного анализа, оценена в 15%. Важно отметить, что, благодаря методике одновременного набора данных во всем диапазоне энергий, обе эти ошибки не искажают измеренной энергетической зависимости сечений. E-зависимость сечений наиболее тщательно была изучена на углеродной мишени [21]. Установлено изменение температуры (наклона) спектров вблизи кинематической границы  $x_c \simeq 1$  от  $T(x_c \leq 1) = T_1 = 63$  МэВ до  $T(x_c \geq 1) = T_2 = 48$  МэВ. Из этой закономерности выпадают данные, полученные в ФНАЛ при 400 ГэВ (рис.17). Единственное объяснение этому, исключая аномальное изменение режима фрагментации ядер при  $E > 65$  ГэВ, - это наличие импульсно зависимой систематической ошибки в данных при 400 ГэВ. Согласно кварковым моделям кумулятивного эффекта, предполагающим спектаторный механизм рождения кумулятивных мезонов, зависимость инвариантного сечения от масштабной переменной  $x_c$  при  $\theta \simeq 180^\circ$  ( $q^T = 0$ ) должна отражать кварк-партоновую структурную функцию ядра  $G(x, q^T = 0) \sim \exp(-x/x_0)$ , при этом зависимость параметра наклона  $x_0$  от энергии при выходе на режим "асимптотической свободы" должна отсутствовать. На рис.18 показано данные по  $x_0$  для реакций

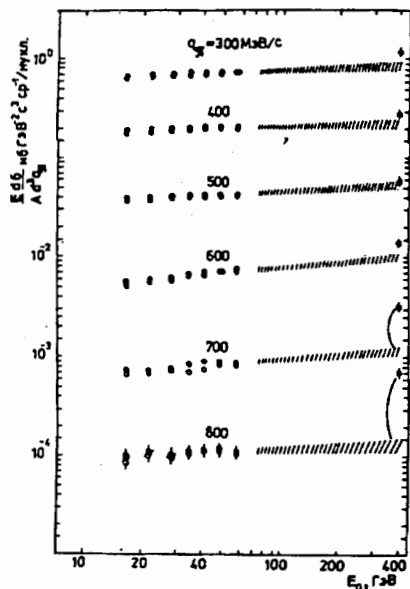


Рис.19.  $E$ -зависимость сечений для  $\pi^+$  (●) и  $\pi^-$  (○) при различных импульсах пионов в реакции  $p + C \rightarrow \pi + X$ . Штриховые полосы – экстраполяция сечений зависимостью  $\sigma(q, E) = C(q) \cdot (1 + B(q) \log E)$  в область энергий ФНАЛ.

$p + C(Be, Al) \rightarrow \pi + X$  при энергиях от 8.9 до 400 ГэВ. В кумулятивной области ( $x > 1$ ) параметр  $x_0$  уменьшается от 0.12 до 0.105 при увеличении энергии от 8.9 до 57 ГэВ. Значение  $x_0$  при 400 ГэВ несовместимо с данными при более низких энергиях, эта аномалия затрудняет оценку асимптотического значения  $x_0$ .

Абсолютная величина сечений в реакции  $p + A \rightarrow \pi + X$  логарифмически растет в диапазоне энергий от 15 до 60 ГэВ (рис.19), возрастая на 15-20%.  $E$ -зависимость может быть параметризована в виде

$$\frac{E}{A} \frac{d\sigma}{d^3q} = C(1 + B(q) \log E). \quad (5)$$

Значения  $B(q)$  увеличиваются вдвое в интервале импульсов пионов от 300 до 800 МэВ [21]. Отмеченные особенности  $E$ -зависимости кумулятивных спектров характерны для всего набора ядер от Be до W.

$A$ -зависимость кумулятивных спектров носит усиленный характер, для  $A \geq 20$  она приближенно имеет объемный вид  $\sigma \sim A^1$ . Получение точных данных в широком диапазоне значений  $A$  и кумулятивных чисел в нашем эксперименте, позволило провести более подробный анализ  $A$ -зависимости [15,24]. Была выявлена существенная корреляция между степенью  $A$ -зависимости и значением кумулятивного числа  $x_c$ . На рис.20

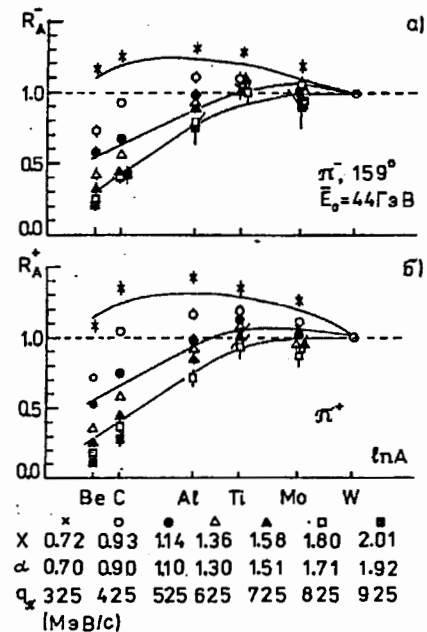


Рис.20. Отношения нормированных на нуклон сечений для  $\pi^+(R_A^+)$  и  $\pi^-(R_A^-)$  -мезонов при  $\bar{E}_0 = 45$  ГэВ и различных значениях кумулятивных чисел от  $x=0.72$  до  $x=2.01$ .

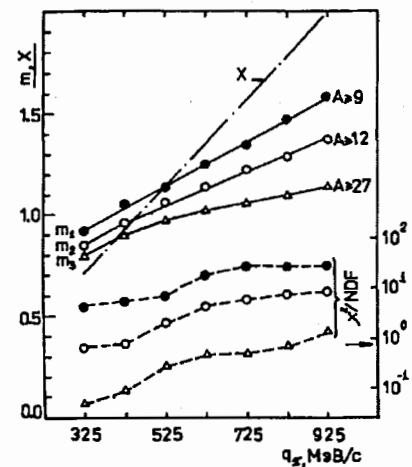


Рис.21. Поведение параметра  $t(x_c)$  при различном ограничении интервала  $A$  снизу. Пунктиром показаны значения  $\chi^2$  при трех значениях  $A_{min}$ .

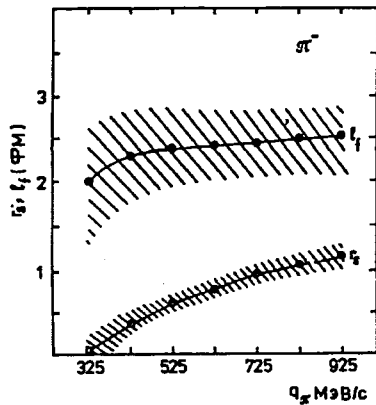


Рис.22. Эффективная длина формирования  $l_f$  и толщина  $r_s$  пассивного поверхностного слоя ядер для кумулятивных пионов различного импульса.

показано отношение  $R_A = \sigma_A/\sigma_W$  нормированных на нуклон инвариантных сечений  $\sigma_A = \frac{E}{A} \frac{d\sigma}{d^3q}$  к сечению на вольфраме. Результаты фитирования степенной зависимостью  $\sigma_{inv} \sim A^m(x_c)$  показаны на рис.21. Степенное описание удовлетворительно по критерию  $\chi^2$  только в области средних и тяжелых ядер ( $A \geq A_{min} \simeq 27$ ). Характерно однако, что при любых  $A_{min}$   $m$  растет линейно с  $x_c$ . Наблюдаемая  $A$ -зависимость была количественно воспроизведена при использовании модифицированной мультикварковой модели [15] допускающей, что (а) из-за зависимости вероятности образования мультикварковых кластеров от плотности ядерного вещества диффузный поверхностный слой ядра слабо участвует в формировании кумулятивных частиц, при этом толщина пассивного слоя  $r_s$  возрастает с увеличением порядка кумулятивности; (б) в формировании спектров кумулятивных адронов существенную роль играют вторичные взаимодействия в ядрах, вклад которых скоррелирован с длиной формирования адронов  $l_f$ . На рис.22 показана зависимость от импульса пионов  $r_s$  и  $l_f$ , используемых в качестве свободных параметров модели.

Изучение образования кумулятивных каонов и антибарионов представляет особый интерес из-за связи механизма их образования с особенностями кваркового моря в ядрах. Наиболее очевидна эта связь в случае "морских" кумулятивных частиц,  $K^-$  и  $p^-$ , не содержащих в своем составе валентных кварков ядра. Сечения образования кумулятивных  $K^\pm$ -мезонов под углом  $159^\circ$  и энергиях протонов  $E_p=15-65$  ГэВ были измерены нами при импульсах до 800 МэВ/с на ядрах  $Be, C, Al, Ti, Mo$  и  $W$  (рис.23).

Наклоны спектров  $E d\sigma/d^3q = C \exp(-T/T_0)$  для  $K^+$  и  $K^-$  примерно одинаковы, как и в случае пионов температуры  $T_0 \simeq 45$  МэВ несколько возрастают ( $\sim 5\%$ ) в интервале  $A$  от 9 до 184. Однако  $A$ -зависимость выходов  $K^+$  и  $K^-$ -мезонов существенно различна: отношение нормированных сечений для вольфрама и бериллия

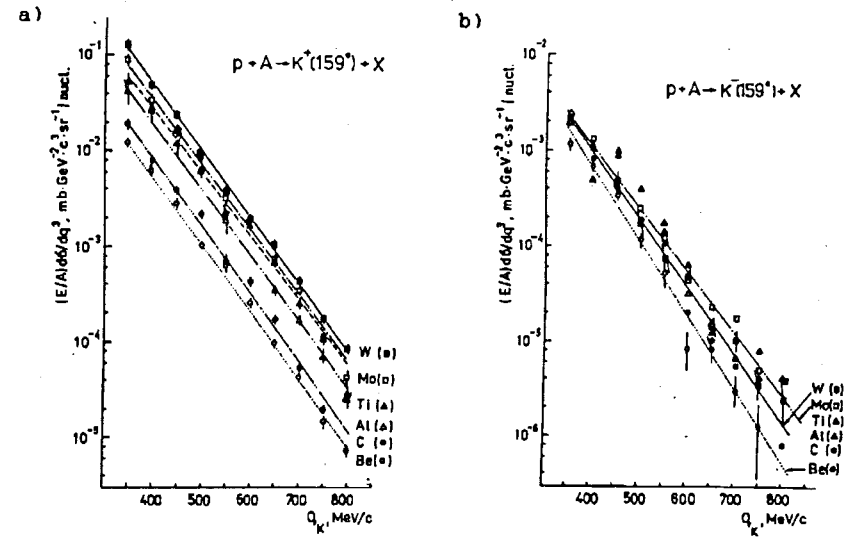


Рис.23. Инвариантные сечения образования  $K^\pm$ -мезонов в реакции  $p + A \rightarrow K(159^\circ) + X$  при  $E_p=40$  ГэВ.

$R_A(K^+) = \frac{W}{Be} \simeq 10$  для  $K^+$  и  $R_A(K^-) \simeq 2$  для  $K^-$ . Соответственно, при степенной аппроксимации  $A$ -зависимости,  $\sigma \sim A^m$ , показатель  $m=1.6$  для  $K^+$  и 1.15 для  $K^-$ . С позиций кварковой модели фрагментации флуктонов подобие наклонов пионных и каонных спектров может быть интерпретировано как указание на то, что распределение странных "морских" кварков во флуктонах сравнимо по жесткости с распределением  $u$ - и  $d$ -кварков в ядре. Сильное различие  $A$ -зависимостей  $K^+$  и  $K^-$ -мезонов в значительной степени может быть объяснено, как показано в гл.5, различной степенью искажений спектров (из-за значительной разницы  $K^+N$  и  $K^-N$  сечений) вторичными взаимодействиями в ядре.

В рамках кварковых флуктонных моделей кумулятивного эффекта отношение выходов кумулятивных адронов различного типа ( $\frac{\pi^-}{\pi^+}, \frac{K^-}{K^+}$ ) может быть связано с кварковым составом флуктонов, а импульсная зависимость этих отношений – с импульсным распределением структурных кварков в них. Чтобы выявить соответствующие эффекты, измерение отношений должно выполняться с точностью  $\sim 2-3\%$ , поскольку, например, соотношение  $u$ - и  $d$ -кварков в изотоп-несимметричных ядрах отличается от 1 не более, чем на 15%. Наши измерения отношения выходов  $\pi^\pm$ -мезонов в сокоупности с данными других экспериментов (при  $E < 10$  ГэВ) показывали [9], что при энергии  $E \simeq 4-5$  ГэВ это отношение выходит на уровень  $\sim 1$ , демонстрируя тем самым выход на режим предельной фрагментации ядер (рис.24). Зависимость отношения  $R(-/+)$  от импуль-



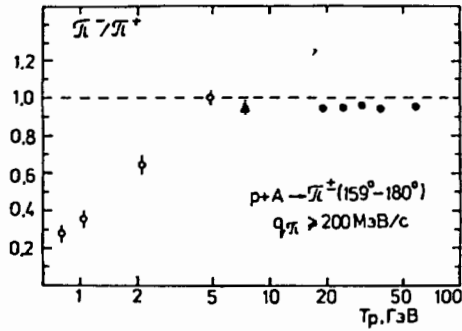


Рис.24. Изменение отношения выходов  $\pi^-$  к  $\pi^+$  в реакции  $p + A \rightarrow \pi(\theta > 90^\circ) + X$  при возрастании энергии протонов от 1 до 70 ГэВ (точки при  $T_p < 5$  ГэВ – данные Шредера, Берли).

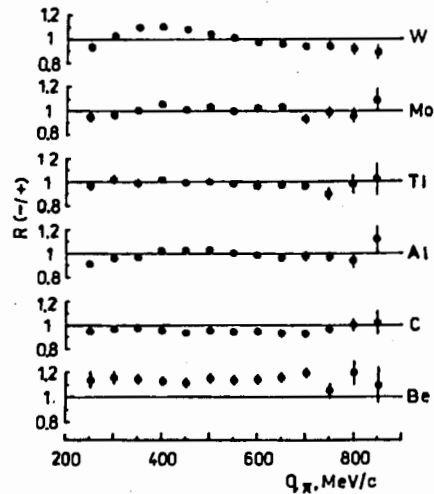


Рис.25. Импульсная зависимость отношения  $R(-/+)$  выходов  $\pi^-$  и  $\pi^+$ -мезонов в реакции  $p + A \rightarrow \pi(159^\circ) + X$  для различных ядер.

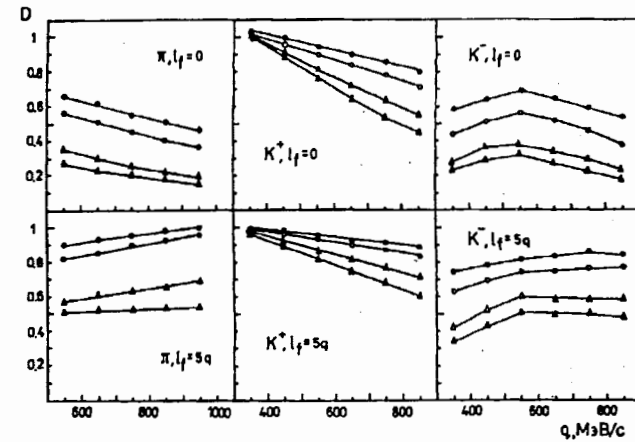


Рис.26. Коэффициенты искажения мезонных спектров для ядер  $C(\bullet)$ ,  $Al(\circ)$ ,  $Mo(\Delta)$ ,  $W(\Delta)$  для двух значений длин формирования адронов  $l_f = 0$  и  $l_f = 5q$ .

сов пионов, измеренная нами для шести ядер от Ве до W, показана на рис.25. Во всех случаях отклонение R от 1 не превышает 20%. Существенная импульсная зависимость может быть отмечена только у ядра вольфрама. Количественная корреляция между отношением d- и u-кварков и отношением R наблюдается только у легких ядер. Для Ве и С эти отношения соответственно равны:  $(d/u)_{Ве} = 1.08$ ,  $R_{Ве} = 1.12$  и  $(d/u)_C = 1.00$ ,  $R_C = 0.95$ . "Стирание" подобной корреляции у более тяжелых ядер может быть связано с возрастающей ролью вторичных взаимодействий в ядрах.

В главе 5 обсуждается проблема искажения спектров кумулятивных мезонов вторичными взаимодействиями в ядрах. Для оценки величины искажений был проведен розыгрыш событий рождения и прохождения кумулятивных мезонов в ядрах с использованием общеизвестной техники расчета ядерного каскада [25]. При рассмотрении взаимодействий мезонов с нуклонами ядра учитывались упругий и неупругий каналы, а также взаимодействия с перезарядкой. Из-за отсутствия точных теоретических оценок длины формирования мезонов  $l_f$  мы провели расчет для двух значений  $l_f = 0$  и  $l_f = 5q$  [Фм] ( $q$ -импульс мезона в ГэВ/с), исходя из того что, оценки  $l_f$ , полученные на основе экспериментальных данных, лежат в этом интервале. Для количественной оценки величины искажений вычислялось отношение  $D = N_1/N_0$ , где  $N_1 = N_1(p, \theta)$  - "регистрируемый" поток мезонов и  $N_0$  - исходный поток мезонов, генерируемый при тех же  $p$  и  $\theta$ . Полученные величины коэффициента искажений для 4-х ядер показаны на рис.26. Корректировка спектров на взаимодействия в конечном состоянии (ВКС) усиливает степень А-зависимости и сближает ее вид для мезонов различного типа (рис.27).

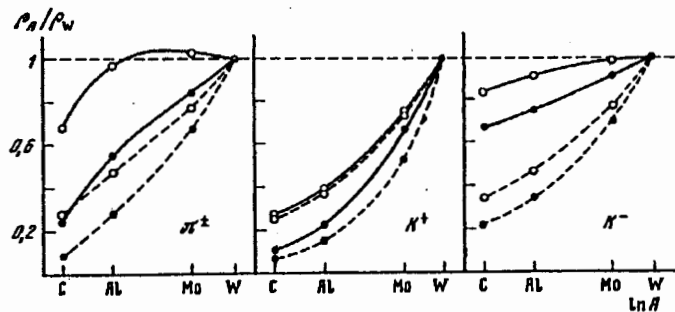


Рис.27. А-зависимости выхода мезонов экспериментально наблюдаемые (сплошные кривые) и скорректированные на ВКС (штриховые кривые) для двух значений переменной  $x_c = 1(\circ)$  и  $x_c = 1.9(\bullet)$ .

В главе 6 описан эксперимент по измерению поляризации кумулятивных протонов. Сведения о поляризации, полученные в предшествующих экспериментах, носили противоречивый характер. Эксперимент был поставлен с целью:

- провести измерение поляризации с низким уровнем статистических и систематических погрешностей;
- исследовать энергетическую зависимость эффекта в области свыше 10 ГэВ, где полностью отсутствовали данные по поляризации в кумулятивных процессах;
- исследовать зависимость поляризации от импульса протонов, включая область свыше 800 МэВ/с, практически неисследованную;
- сопоставить величину эффекта при малых ( $\theta \sim 160^\circ$ ) и больших ( $\theta \sim 90^\circ$ ) поперечных импульсах;
- получить оценку А-зависимости поляризации.

Эксперимент был выполнен по схеме опыта по двойному рассеянию: кумулятивные протоны от первой мишени направлялись на мишень-анализатор и измерялась левая-правая асимметрия рассеяния. Измерения были проведены при двух углах выхода кумулятивных протонов 158 и  $95^\circ$  [18,20]. Для выполнения измерений установка СКА была модифицирована в поляриметр (рис.28)[14]. Основные результаты измерения поляризации представлены на рис.29 [26].

Для оценки влияния процесса перерассеяния на поляризацию протонов, вылетающих в заднюю полусферу, мы провели Монте Карло моделирование прохождения протонов в ядерной среде с контролем спинового состояния в актах перерассеяния [19]. Результаты расчета показаны на рис.29.

В главе 7 просуммированы основные физические результаты исследования кумулятивного образования адронов при энергиях от 15 до 65 ГэВ.

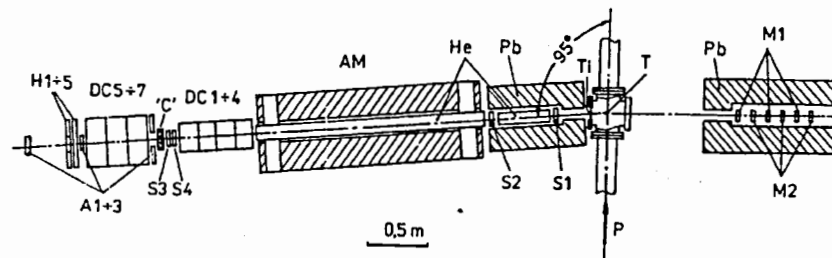


Рис.28. Схема поляриметра (ось поляриметра выставлена под углом  $95^\circ$  к направлению первичных протонов). Т - первичная мишень, "С" - углеродная мишень-анализатор; S1-4, A1-3 - триггерные и антисовпадательные счетчики; DC1-7 - дрейфовые камеры; H1-5 - годоскопические счетчики; AM - анализирующий магнит; M1, M2 - мониторы.

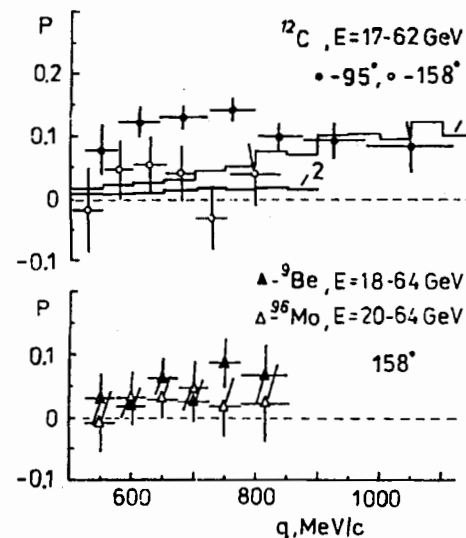


Рис.29. Импульсная зависимость поляризации  $P$  (усредненной по указанным  $E$ -интервалам) кумулятивных протонов  $p_c$  в реакциях  $p + {}^{12}\text{C} \rightarrow p_c(95^\circ, 158^\circ) + X$ ,  $p + {}^9\text{Be} \rightarrow p_c(158^\circ) + X$ ,  $p + {}^{96}\text{Mo} \rightarrow p_c(158^\circ) + X$ . Кривые - результаты расчета по модели ядерного каскада в предположении, что поляризация кумулятивного протона в точке рождения равна нулю.

В опытах по упругой дифракции:

- На основании измерения дифференциальных сечений упругого  $pp$ -рассеяния в области кулон-ядерной интерференции ( $0.0003 \leq |t| \leq 0.01$ ) изучена энергетическая зависимость отношения вещественной части ядерной амплитуды к мнимой  $\alpha = ReA_n/ImA_n$  в интервале энергий от 10 до 70 ГэВ.
- Разработана электронная методика исследования упругого рассеяния протонов на внутреннем пучке ускорителя с использованием полупроводниковых детекторов и газовой струйной мишени. Созданная аппаратура, работающая на линии с ЭВМ (первый on-line спектрометр на ускорителях высоких энергий в СССР), обеспечила возможность измерения дифференциальных сечений в области малых углов рассеяния с рекордной точностью, благодаря чему значения  $\alpha(E)$  были измерены с точностью сравнимой с теоретической неопределенностью в вычислении  $\alpha(\delta\alpha \simeq 0.01)$ .
- Разработана методика использования тонких пленочных, нитяных и струйных газовых мишеней на внутренних пучках циклических ускорителей со стабилизацией режима наведения на мишень с помощью активной обратной связи для управления радиальным положением пучка.
- Создан комплекс мишеней и регистрирующей аппаратуры, который полностью обеспечил выполнение эксперимента на внутренней мишени ускорителя У-400 ФНАЛ (США).
- В эксперименте Е-36 ФНАЛ измерены дифференциальные сечения упругого  $pp$ -рассеяния в области  $0.0003 \leq |t| \leq 0.16$ , определено поведение параметра наклона  $b(E)$  дифракционного конуса и реальной части амплитуды рассеяния  $\alpha(E)$  в области энергий от 50 до 400 ГэВ.
- На основании экспериментальных данных, полученных в опытах на У-70 и У-400, установлено, что в области энергий от 9 до 400 ГэВ дифракционный конус в  $pp$ -рассеянии сжимается, при этом параметр наклона  $b$  растет с энергией от  $8.7$  до  $11.9$  (ГэВ/с) $^{-2}$ . В рамках оптико-геометрических представлений это указывает на рост радиуса области сильного взаимодействия протонов. Логарифмический рост  $b(s)$  при  $s > 30$  ГэВ $^2$  соответствует пределам допустимым при выполнении базисных аксиом квантовой теории поля.
- Получены значения сечения полного упругого протон-протонного рассеяния  $\sigma_{el}(E)$  в области энергий от 9 до 312 ГэВ. Показано, что отношение упругого сечения к полному  $\sigma_{el}/\sigma_T$  монотонно уменьшается от 0.25 до 0.184 с увеличением энергии

до 100 ГэВ и в интервале от 100 до 300 остается постоянным на уровне близком к пределу Ван Гоффа (0.185), установленному для гауссообразного абсорбционного профиля протона.

- Установлено, что отношение реальной части амплитуды к мнимой  $\alpha^{pp}(E)$  для  $pp$ -рассеяния вперед в области энергий от 9.4 до 400 ГэВ изменится от -0.35 до +0.04, меняя знак при  $E=270$  ГэВ. Показано, что поведение  $\alpha^{pp}(E)$  и полного сечения  $\sigma_T^{pp}$  остается согласованным в рамках дисперсионных соотношений во всем изученном диапазоне энергий, подтверждая справедливость основных постулатов квантовой теории поля для амплитуд бинарных реакций (унитарность, микропричинность, аналитичность, кроссинг-симметрия).
- На основании установленного поведения  $\alpha^{pp}(E, t=0)$  и дисперсионных соотношений для реальной и мнимой частей амплитуды рассеяния сделано предсказание о дальнейшем росте полного сечения  $\sigma^{pp}(E)$  до энергий  $E \simeq 2000$  ГэВ, которое косвенно подтверждается данными с  $\bar{p}p$ -коллайдеров и может быть в ближайшее десятилетие непосредственно подтверждено данными со строящихся  $pp$ -коллайдеров RHIC и LHC.

2) В эксперименте по исследованию кумулятивного образования адронов в протон-ядерных взаимодействиях при энергиях от 15 до 65 ГэВ:

- Создан компактный магнитный спектрометр с трековыми детекторами (дрейфовые камеры) для измерения импульсных распределений адронов, рожденных на внутренней мишени ускорителя У-70 (ИФВЭ, Серпухов), в  $pA$ -взаимодействиях.
- С высокой статистической точностью (3-4%) выполнено измерение дифференциальных инвариантных сечений  $\sigma_{inv} = E d\sigma/d^3q$  образования пионов, каонов и протонов на ядрах Be, C, Al, Ti, Mo и W под углом  $159^\circ$  в интервале импульсов адронов от 250 до 1000 МэВ/с (1300 - для протонов) в области энергий первичных протонов от 15 до 68 ГэВ. При этом в шкале кумулятивной переменной  $x_c$  был перекрыт диапазон от 0.6 до 2.0 для пионов и от 0.9 до 1.8 для каонов.
- Выполненное в широком диапазоне энергий измерение отношения выхода кумулятивных пионов различного знака показало (с учетом данных, полученных при более низких энергиях), что начиная с энергий 4-5 ГэВ,  $\pi^-/\pi^+$ -отношение выходит на постоянный уровень  $\simeq 1$ , демонстрируя выход на режим предельной фрагментации ядер именно при этом энергетическом пороге  $E_{\pi}$ .
- Установлено, что отношение  $R(\pi^-/\pi^+)$  выхода пионов разного знака слабо зависит от кумулятивного числа  $x_c$  для всех ядер. В рамках флуктоных кварковых моделей это может быть интерпретировано как указание на идентичность импульсных распределений  $u$ - и  $d$ -кварков во флуктонах при  $x > 1$ .

- Установлено, что абсолютные значения инвариантных сечений  $\sigma_{inv}(\pi)$  в диапазоне энергий от 15 до 65 ГэВ увеличиваются в зависимости от кумулятивного числа  $x_c$  и атомного номера ядра на 20-40%, что говорит о приближенном характере "ядерного" скейлинга, характерного для спектров кумулятивных адронов.
- Тщательно изучена А-зависимость кумулятивных сечений. Впервые, на основе данных в широком диапазоне  $x_c$ , достоверно показано, что А-поведение носит явно выраженную зависимость от  $x_c$ , а именно с ростом  $x_c$  она усиливается. Для  $A > 20$  степенная аппроксимация А-зависимости в форме  $\sigma \sim A^m$  характеризуется  $x_c$ -зависимым параметром  $m(x_c) = 2/3 + x_c/3$ .
- На основе модели ядерного каскада выполнены расчеты по оценке величины искажений спектров кумулятивных адронов их взаимодействиями в конечном состоянии (ВКС). Оцененный эффект искажений (при углах выхода близких к  $180^\circ$ ) очень значителен в абсолютном выходе и А-зависимости для кумулятивных пионов и каонов. Учет ВКС коррекции существенно меняет характер А-зависимости, усиливая ее отличие от объемной и сближая А-зависимость для адронов разного кваркового состава. Установленное подобие А- и  $x_c$ -зависимостей инвариантных сечений для кумулятивных адронов разного типа ( $\pi^\pm, K^\pm$ ) позволяет сделать вывод об универсальности механизма их рождения и, в рамках флуктонных кварковых моделей, о равной жесткости  $x$ -распределений  $u, d$  и  $s$  кварков во флуктонах.
- Создан поляриметр с трековыми детекторами и проведено исследование спиновых эффектов в кумулятивном рождении протонов и дейтронов с импульсами до 1000 ГэВ/с при углах выхода  $158$  и  $95^\circ$  на ядрах Ве, С и Мо.
- Установлено, что поляризация кумулятивных протонов  $P_p(E_0, q, \theta)$  имеет сильно выраженную угловую зависимость, но незначительна по величине ( $P_p(\theta = 95^\circ) \simeq 10\%$ ) и имеет слабую зависимость от кумулятивного числа (импульса протонов  $q$ ) и энергии первичных протонов  $E_0$ . Поляризация кумулятивных дейтронов в пределах ошибок измерения отсутствует ( $P_d < 3\%$ ).
- Создана программа моделирования прохождения протонов в ядерной среде с отслеживанием его спинового состояния. Выполненные расчеты показали, что наблюдаемая поляризация кумулятивных протонов может быть в основном объяснена поляризацией, приобретаемой в актах перерасеяния на нуклонах ядра, т.е. поляризация протонов в первичном акте кумулятивного рождения близка к нулю.

1. Г.И.Забиякин, Л.С.Золин, В.А.Никитин, В.Н.Соловьев, В.Г.Тишин, Т.Шетет, В.Д.Шибяев. Многопараметровая спектрометрическая установка с непосредственным выводом информации в цифровую вычислительную машину. Сообщение ОИЯИ 13-3397, Дубна, 1967.
2. Л.С. Золин, В.А. Никитин, Ю.Л. Пилипенко. Формирование и улавливание газовой водородной струи в вакууме. Сообщение ОИЯИ, P13-3425, Дубна, 1967; Criogenics, June 1968, p.143.
3. В.А.Бартенев, А.А.Белушкина, Н.К.Жидков, Л.С. Золин, Б.А. Морозов, В.А. Никитин, П.В. Номоконов, Ю.К. Пилипенко, В.А. Свиридов, М.Г. Шафранова. Методика исследования взаимодействия протонов на протонах и ядрах на внутреннем пучке ускорителя с использованием газовой струйной мишени. Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 1970; т.1, в.1, стр.16, Дубна, 1971; Препринт ОИЯИ 13-5235, Дубна, 1970.
4. В.А. Бартенев, Г.Г. Безногих, А. Буяк, Н.К. Жидков, В. Заячки, Л.С. Золин, Л.Ф. Кириллова, Б.А. Морозов, В.А. Никитин, П.В. Номоконов, Ю.К. Пилипенко, А. Сандач, В.А. Свиридов, Чыонг Бьен, М.Г. Шафранова. Исследование упругого протон-протонного рассеяния в области интерференции кулоновского и ядерного взаимодействий в интервале энергий 8-70 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-6246, Дубна, 1970г; ЯФ 16 (1972) 96.
5. G.G. Beznogich, A.Buyak, K.I. Iovchev, L.F. Kirillova, P.K. Markov, V.A. Morozov, V.A. Nikitin, P.V. Nomokonov, Yu.K. Pilipenko, A. Sandach, M.G. Shafranov, V.A. Sviridov, Truong Bien, V.I. Zayachki, N.K. Zhidkov, L.S. Zolin. *Small Angle Proton-Proton Elastic Scattering from 9 to 70 GeV/c*. Phys.Lett. **39B** (1972) 411.
6. G.G.Beznogich, A.Buyak, V.A.Nikitin, M.G.Shafranov, V.A.Sviridov, Truong Bien, L.V.Vikhlyantseva, V.I.Zayachki and L.S.Zolin. *Total Elastic p-p,p-d,p-n Cross Sections in the Energy Range of 1-70 GeV*. Phys.Lett. **43B** (1973) 85.
7. V. Bartenev, A.Kuznetsov, B.Morozov, V.Nikitin, Y.Pilipenko, V.Popov, L.S. Zolin, R.A.Carrigan, Jr., E.Malamud, R.Yamada, R.L.Cool, K.Goulios, I-Hung Chiang, A.C.Melissinos, D.Gross, and S.L.Olsen. *Measurement of the Slope of the Diffraction Peak for Elastic p-p Scattering from 8 to 400 GeV/c*. Phys. Rev. Lett. **31** (1973) 1088.
8. V. Bartenev, R.A.Carrigan, I-Hung Chiang, R.L.Cool, K.Goulios, D.Gross, A.Kuznetsov, E.Malamud, A.C.Melissinos, B.Morozov, V.Nikitin, S.L.Olsen, Y.Pilipenko, V.Popov, R.Yamada, and L.S. Zolin. *Real Part of the Proton-Proton*

- Forward-Scattering Amplitude from 50 to 400 GeV. Phys. Rev. Lett. **31** (1973) 1367.
9. И.М. Беляев, О.П.Гавришук, Л.С. Золин, А.Г.Карев, В.В.Лобанов, А.Ю.Сушапов. Отношение выходов кумулятивных пионов разного знака в протон-ядерном взаимодействии при энергии протонов от 17.5 до 63 ГэВ. Краткие сообщения ОИЯИ 84-85, с.29, Дубна,1985.
  10. И.М. Беляев, О.П.Гавришук, Л.С. Золин, В.Ф.Переседов, С.В.Фролов. Моделирование геометрической эффективности спектрометра кумулятивных адронов (установка СКА). Оценка роли геометрических факторов и фоновых процессов Сообщение ОИЯИ P1-429, Дубна,1987.
  11. И.М. Беляев, О.П.Гавришук, Л.С.Золин, В.Ф.Переседов. Черенковский счетчик с водяным радиатором с преобразователем спектра. Сообщение ОИЯИ 13-87-104, Дубна,1987.
  12. И.М.Беляев, О.П.Гавришук, Л.С. Золин, В.Ф.Переседов, П.А.Рукояткин, А.Н.Хренов. Спектрометр кумулятивных адронов (компоновка, детекторы, электроника). Сообщение ОИЯИ P1-88-341, Дубна,1988;
  13. И.М. Беляев, О.П.Гавришук, Л.С. Золин, В.Ф.Переседов, А.Ю.Сушапов. Спектрометр кумулятивных адронов (сбор данных, анализ событий). Сообщение ОИЯИ P1-88-342, Дубна,1988.
  14. В.П.Баландин, И.М. Беляев, В.В.Випев, Н.В.Власов, О.П.Гавришук, Л.С.Золин, Е.В.Казаренко, Н.А.Кузьмин, В.Ф.Переседов, Ю.П.Петухов, С.В.Фролов. Поляриметр с трековым детектором. Сообщение ОИЯИ P1-88-408, Дубна,1988;
  15. И.М.Беляев, О.П.Гавришук, Л.С.Золин, В.Ф.Переседов. А-зависимость сечений образования кумулятивных пионов в протон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях. Краткие сообщения ОИЯИ 7[33]-88 с.38, Дубна,1988.
  16. И.М. Беляев, Н.В.Власов, О.П.Гавришук, Л.С. Золин, В.Ф.Переседов, А.Б.Шалыгин. Поляризация кумулятивных протонов в реакции при энергии первичных протонов от 17 до 68 ГэВ. Краткие сообщения ОИЯИ 2[28]-88 с.5, Дубна,1988.
  17. И.М.Беляев, О.П.Гавришук, Л.С.Золин, В.В.Лобанов, Н.С.Мороз, В.Ф.Переседов. Сечения образования  $\pi^+$  и  $\pi^-$  мезонов под углом  $159^\circ$  в протон-ядерных взаимодействиях при энергии первичных протонов от 15 до 65 ГэВ. Сообщение ОИЯИ P1-89-112, Дубна,1989.
  18. И.М. Беляев, Н.В.Власов, О.П.Гавришук, Л.С. Золин, В.Ф.Переседов. Спинные эффекты в кумулятивном образовании протонов и дейтронов в протон-ядерных взаимодействиях при энергиях 16-64 ГэВ. Сообщение ОИЯИ P1-89-463, Дубна,1989.
  19. О.П. Гавришук, Л.С.Золин, И.Г. Косарев. Оценка "Монте-Карло" вклада вторичных процессов в поляризацию кумулятивных протонов. Сообщение ОИЯИ P1-91-528, Дубна,1989.
  20. И.М. Беляев, Н.В.Власов, О.П.Гавришук, Л.С. Золин, В.Ф.Переседов, С.В.Фролов. Измерение асимметрии рассеяния кумулятивных протонов и дейтронов, вылетающих под углом  $95^\circ$  л.с. в рС- взаимодействиях при энергии первичных протонов от 17 до 62 гзВ. Поляризация кумулятивных протонов. Краткие сообщения ОИЯИ 1[34]-89 с.5, Дубна,1989.
  21. И.М. Беляев, О.П.Гавришук, П.И.Зарубин, Л.С. Золин, В.Ф.Переседов, П.А.Рукояткин, А.Ю.Сушапов, С.В.Фролов. Энергетическая зависимость выхода пионов в реакции  $p + C \rightarrow \pi^\pm(159^\circ) + X$  при энергии протонов от 15 до 61 ГэВ. ЯФ 49 (1989) 473.
  22. O.P.Gavrishchuk, N.S.Moroz, V.F.Peresedov, and L.S.Zolin. Charged Pion Backward Production in 15-65 GeV Proton-Nucleus Collisions. Nucl. Phys. **A253** (1991) 589.
  23. O.P. Gavrishchuk, V.F. Peresedov, L.S. Zolin.  $K^\pm$  Backward Production in pA Interactions at 15-65 GeV. JINR Rapid Communications No.4[55]-92, p.4, Dubna,1992.
  24. И.М. Беляев, О.П.Гавришук, Л.С. Золин, В.Ф.Переседов. Образование кумулятивных пионов и каонов в протон-ядерных взаимодействиях при энергиях от 15 до 65 ГэВ. ЯФ 56 (1993) 135.
  25. Л.С.Золин, В.Ф.Переседов. Искажения спектров кумулятивных мезонов вторичными взаимодействиями в ядрах. Краткие сообщения ОИЯИ 3 [54]-92, стр.59, Дубна, 1992. V.F.Peresedov, L.S.Zolin, -Physica Scripta, v.48, p.210,1993.
  26. O.P.Gavrishchuk, V.F.Peresedov, N.V.Vlasov, L.S.Zolin and I.M.Beliaev. Polarization of Backwardly produced Protons in Proton-Nucleus Collisions at 17-64 GeV. Phys. Lett. **B255** (1991) 321.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 апреля 1996 года.