

М-925



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-83-633

МУХИН

Сергей Васильевич

**НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ПРОТОНОВ
НА ВОДОРОДЕ И ДЕЙТЕРИИ
ПРИ МАЛЫХ ПЕРЕДАННЫХ ИМПУЛЬСАХ
В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ 50-400 ГэВ**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1983

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединённого института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН СССР, доктор
физико-математических наук, профессор

Е.Л.Фейнберг

доктор физико-математических наук,
профессор

С.П.Денисов

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

В.А.Копылов-Свиридов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Защита диссертации состоится " _____ " 1983 г.
в " _____ " часов на заседании специализированного совета Д-047.01.02,
при Лаборатории высоких энергий Объединённого института ядерных
исследований, г.Дубна, Московской области, Лаборатория высоких
энергий ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " 1983 г.

Учёный секретарь
специализированного совета
кандидат физ.-мат.наук

М.Ф.Лихачёв

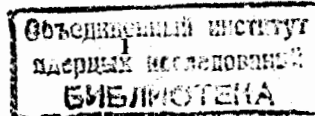
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному изучению проблемы неупругого взаимодействия протонов с протонами и дейтронами в неизученной ранее области энергий 50+400 ГэВ и переданных импульсов $0,01+0,13$ (ГэВ/c)². В этой области кинематических переменных ярко проявляется явление неупругой дифракции, всестороннему исследованию свойств которого уделено большое внимание. При изучении неупругого рассеяния на дейтерии получены новые характеристики пространственно-временного развития сильных взаимодействий, одной из которых является явление антиэкранирования. Исследование мягких процессов в адронной физике при высоких энергиях является одним из традиционных научных направлений Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Работа велась в соответствии с Проблемно-тематическим планом Лаборатории.

Актуальность проблемы. Исследование процессов сильных взаимодействий, проходящих с малой передачей импульса, является одной из основных задач многих лабораторий мира. Сечения этих процессов составляют большую часть полного сечения адрон-адронных взаимодействий и полностью включают в себя дифракционные явления в физике высоких энергий.

Дифракционное рассеяние протонов является характерным для физики высоких энергий процессом, общие черты которого определяются такими глубокими физическими понятиями, как волновая природа частиц, унитарность, лоренц-инвариантность, микропричинность и протяжённость адронов. Неупругая дифракция или дифракционная диссоциация даёт возможность наблюдать возбуждение внутренних степеней свободы и оказывается чувствительной к особенностям структуры адронов и поведению их конститuentов при взаимодействии.

Детальные экспериментальные сведения об этих процессах при высоких энергиях имеют существенное значение для современных теоретических построений. Наибольший интерес в настоящее время к дифракционному рассеянию и особенно к такому явлению, как неупругая дифракция, связан с надеждой получить сведения о механизме взаимодействия адронов в рамках квантовой хромодинамики, что является одной из центральных задач современной физики высоких энергий.



Цель работы – систематическое и всестороннее экспериментальное исследование инклюзивных свойств неупругого рассеяния протонов высоких энергий на водороде и дейтерии в широком диапазоне энергий и малых переданных импульсов.

Ко времени начала исследований, составивших основу диссертации, в области высоких энергий ($E > 50$ ГэВ) существовали только отдельные и несистематические данные о взаимодействии адронов высоких энергий с водородом, полученные главным образом с помощью пузырьковых камер при сравнительно невысокой статистике, а также данные ISR , обладавшие недостаточно высоким разрешением по массе. Данные на легчайших ядрах в этой области вообще отсутствовали.

Большой интерес представляло выделение в неупругом рассеянии протонов дифракционной диссоциации, одного из фундаментальных процессов в физике высоких энергий, и изучение его основных характеристик. Не было данных о природе формирования спектра недостающих масс. Оставалось неясным существование (или отсутствие) "резонансной" структуры в этом спектре при высоких энергиях. Исследование рассеяния протонов на дейтерии представляло особый интерес с точки зрения возможностей получения сведений об особенностях взаимодействия так называемых "юных" состояний с нуклонами.

Для решения всех этих вопросов необходимо было выбрать эффективный метод измерений, адекватный поставленной задаче.

Научная новизна и практическая ценность. Впервые в широком диапазоне энергий систематически, с высокой точностью исследована трудно доступная для изучения, но очень важная для теории область физики высоких энергий – неупругие взаимодействия протонов с предельно малыми переданными импульсами. Получена единая картина этого процесса при высоких энергиях и определены важные для теории параметры, характеризующие механизмы, ответственные за рождение и формирование возбужденной системы. Надёжно выделены дифракционные взаимодействия и всесторонне изучены их свойства. Проведён всесторонний анализ и определены основные величины, характеризующие эти процессы. При анализе эффектов перерассеяния в протон-дейтронных взаимодействиях обнаружено явление антиэкранировки, указывающее на неправомерность определения полных сечений взаимодействия "юных" состояний в приближении Глаубера-Ситенко.

Впервые для изучения неупругих процессов в экспериментах использовалась методика регистрации частиц отдачи от струйной мишени, расположенной на внутреннем пучке ускорителя. Применение этого метода стало возможным благодаря проведению специальных методических

разработок, позволивших получить рекордное разрешение по недостающей массе.

Полученные в экспериментах данные до сих пор являются наиболее точными, а в большинстве случаев и единственными в широкой области кинематических переменных.

Достоверность и надёжность экспериментальных данных и результатов их анализа получили подтверждение в последующих работах других авторов. Они инициировали ряд теоретических исследований, использовались при анализе результатов других экспериментальных групп и получили широкое признание мировой научной общественности, о чём свидетельствуют, в частности, обзорные доклады по данной теме на крупнейших международных конференциях.

Созданная экспериментальная аппаратура и программное обеспечение послужили основой для проведения дальнейших исследований мягких упругих и неупругих процессов и разработки предложений по новым экспериментам, в подготовке большинства из которых принимал участие автор.

Апробация диссертации и публикации. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, представлялись на крупнейших международных конференциях: Рочестерских по физике высоких энергий ХУП в Лондоне в 1974 г., ХУШ в Тбилиси в 1976 г., ХХ в Медисоне в 1980 г. и Европейских по физике частиц в Будапеште в 1977 г., Женеве в 1979 г., и докладывались на заседаниях Отделения ядерной физики АН СССР, Американского физического общества.

Материалы диссертации отражены в 34 научных работах, в основу диссертации положено 16 основных публикаций /I-16/, в том числе два обзора /4, II/.

Объём работ. Диссертация состоит из пяти глав, изложена на 165 страницах машинописного текста, включая 63 рисунка, 10 таблиц и 218 названий цитируемой литературы.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Методические разработки, позволившие впервые применить метод регистрации частиц отдачи от струйной мишени, расположенной на внутреннем пучке ускорителя, для исследований неупругих взаимодействий протонов высоких энергий.

2. Экспериментальные результаты по диссоциации протонов на водороде и дейтерии, впервые полученные в единой постановке опытов в широком диапазоне энергий и недостающих масс при малых переданных импульсах.

3. Выделение дифракционной диссоциации из вкладов других механизмов, ответственных за рождение и формирование возбужденных систем и определение параметров, характеризующих это явление.

4. Экспериментальное доказательство наличия неупругой дифракции при исчезающе малых переданных импульсах.

5. Результаты анализа тонкой структуры, впервые обнаруженной при высоких энергиях в спектре недостающих масс.

6. Проверка правильности гипотезы дуальности, выраженной в форме дисперсионных правил сумм при конечной массе.

7. Экспериментальное доказательство роста полных сечений дифракционной диссоциации за счёт расширения с энергией спектра масс, возбужденных в этом процессе.

8. Доказательство применимости обобщенного глауберовского подхода к описанию неупругих адрон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях.

9. Обнаружение эффекта антиэкранировки при диссоциации на дейтроне.

Содержание работы

В первой главе (введение) дана общая характеристика работы, включающая в себя обоснования актуальности решаемой проблемы, цели работы, её научной новизны и практической ценности. Глава заканчивается перечислением основных результатов, вынесенных на защиту, и кратким изложением содержания диссертации.

Во второй главе рассмотрены вопросы теоретического описания неупругих мягких процессов, т.е. процессов, происходящих при взаимодействии на больших расстояниях с малой передачей импульса и энергии мишени. При этом основное внимание было уделено тем теоретическим подходам, которые в последующем были использованы для интерпретации экспериментальных результатов, составивших основу диссертации. Теоретическое описание в основном доведено до формул, пригодных для сравнения с экспериментом. Некоторые из рассмотренных в этой главе теоретических представлений были инициированы полученными в опытах данными и проводились с участием автора^{/13,14,15/}.

Глава состоит из четырёх частей.

В начале главы отмечается важность получения инклюзивной информации для теории сильных взаимодействий, указываются основные причины проявления интереса к мягким процессам, дано определение дифракционной диссоциации и отмечается важная роль этого явления в физике высоких энергий.

В первом разделе на основе квазиоптического или S-канального представления рассмотрен метод собственных состояний, широко используемый в физике высоких энергий. С помощью этого метода показано, как получаются ограничения на массу дифракционно возбужденной системы и теневой характер упругого и дифракционного рассеяния.

Вторая часть посвящена вопросам динамики периферических столкновений на основе общепринятого взгляда на обменный характер взаимодействий адронов. Приводятся формулы для описания диссоциации протонов в состоянии с малой и большой массой, полученные на основе теории комплексных угловых моментов. Показаны ограничения на основные параметры теории, возникающие из гипотезы дуальности, математическим выражением которой являются правила сумм при конечной массе, выведенные на основе дисперсионных соотношений. Отмечены те моменты теории, которые особо критичны для сравнения с экспериментом.

В третьем разделе рассмотрены современные взгляды на сильные взаимодействия, основанные на конститuentных моделях. Здесь на основе кварковой модели показана возможность качественного описания области малых недостающих масс. Для области больших масс получены формулы, позволяющие описать экспериментальные данные без введения свободных параметров^{/14/}. Эти формулы зависят от предположений о внутренней структуре нуклона, которые можно проверить, сравнивая предсказания с экспериментом.

Последняя часть главы посвящена вопросам, связанным с неупругим рассеянием протонов на дейтроне – простейшей и наиболее изученной ядерной системе. Сначала на основе глауберовского рассмотрения проведён анализ предположения о ядерной факторизации^{/11/}, которое в одной из простейших форм широко использовалось при анализе экспериментальных данных. Затем с помощью метода собственных состояний показано, что обобщенная модель Глаубера, учитывающая вклады всех промежуточных состояний, правильно отражает пространственно-временную картину сильных взаимодействий при малых переданных импульсах^{/13/}. При рассмотрении двукратных перерассеяний в рамках двухкомпонентной кварк-партонной модели, в которой все состояния разделены на активную и пассивную части, показано, что амплитуда неупругого рассеяния должна иметь отрицательную мнимую часть по сравнению с упругой^{/13/}. Отрицательный знак амплитуды неупругого рассеяния приводит к тому, что некоторые графики в обобщенной модели Глаубера имеют вклад со знаком, противоположным обычной экранировке, т.е. возникает явление антиэкранировки^{/13/}.

Третья глава посвящена методическим особенностям экспериментов по неупругому рассеянию протонов и разделена на четыре части.

В первом разделе кратко изложен метод регистрации частиц отдачи от тонких мишеней, расположенных на внутреннем пучке ускорителя.

Во второй части рассмотрены особенности применения метода для изучения неупругих событий. В этих экспериментах, в отличие от упругого рассеяния, нет жёсткой кинематической связи между углом рассеяния и переданным импульсом – главного критерия отделения фона от эффекта, и поэтому вопросы изучения фоновых условий приобретают решающее значение. Проведён анализ различных составляющих фона и методов его уменьшения или определения^{/II/}. Главными методическими разработками в этом направлении, обеспечившими успешное проведение экспериментов, являлись: (1) установка коллиматоров, ограничивающих просматриваемую детекторами зону вокруг мишени; (2) применение телескопов из двух и более детекторов для разделения частиц отдачи по массам; (3) разработка подвижного экрана из тяжёлого металла, перекрывающего область взаимодействия пучка с мишенью в поле зрения детекторов телескопа и предназначенного для прямого измерения фона; (4) применение нового способа коллимирования детекторов.

В третьем параграфе этой главы описана структурная схема электронной аппаратуры, использовавшаяся при наборе данных^{/II/}.

В четвёртом разделе рассмотрены некоторые особенности в анализе экспериментальных данных, учитывающие проведённые изменения в регистрирующей аппаратуре^{/I/}. Этот раздел заканчивается рассмотрением возможностей получения физической информации на той же аппаратуре в более широком интервале по переданному импульсу.

В пятой части исследуется зависимость разрешения по недостающей массе от точности определения измеряемых величин^{/II, I2/}. В начале раздела приводятся кинематические формулы и дано сравнение разрешающей способности метода регистрации частиц отдачи с другими способами изучения неупругих взаимодействий в инклюзивных экспериментах. Затем анализируется зависимость разрешающей способности от точности измерения импульса налетающей частицы, кинетической энергии и угла вылета частицы отдачи. Показано, что главным фактором, влияющим на разрешение, является неопределённость в измерении угла вылета, связанная с конечными размерами струи мишени. Рассмотрен применявшийся в экспериментах метод коллимирования мишени с помощью подвижной щели^{/2/}, позволивший улучшить в два раза разрешение по массам.

В шестом, заключительном разделе этой главы, рассматриваются особенности других экспериментов по изучению неупругих взаимодействий при малых переданных импульсах.

В четвёртой главе приводятся полученные в экспериментах данные и результаты их анализа.

Первая часть содержит общие характеристики инклюзивного сечения неупругого рассеяния протонов. Показано, что уже первые результаты, полученные с помощью дейтериевой струйной мишени^{/1,2/}, позволили объединить^{/9/} существовавшие ранее экспериментальные данные в области больших и малых масс и получить общую картину поведения дифференциальных сечений как функцию недостающей массы M_X , при небольших передачах квадрата четырёхимпульса t . Представленная на рис. I зависимость сечений от M_X^2 при фиксированном t и S имеет пик в области малых масс при $M_X^2 \sim 1,9 \text{ ГэВ}^2$, затем резко падает с ростом M_X^2 и выравнивается при $M_X^2 \geq 25 \text{ ГэВ}^2$.

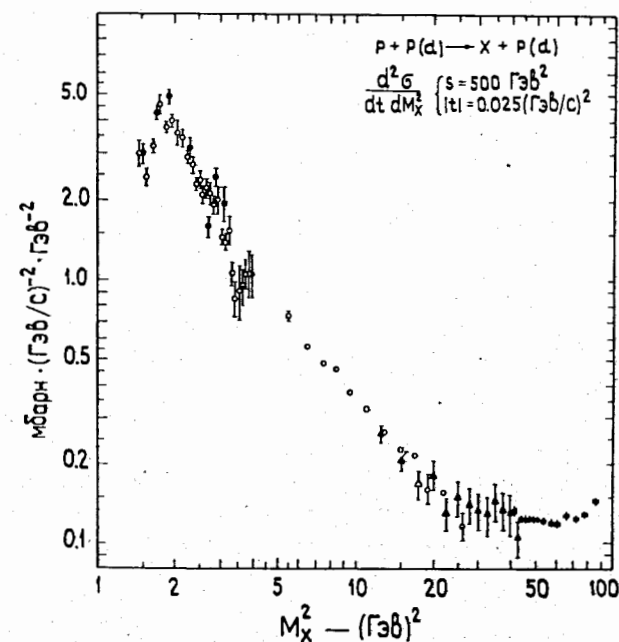


Рис. I Зависимость дифференциального сечения от M_X^2 .
○ – результаты, полученные с помощью дейтериевой струйной мишени;
●, ▲, ■ – ранее существовавшие данные.

Таким образом массовый спектр можно разделить на три области: малых, промежуточных и больших масс. Изучение t – зависимости в диапазоне $0,02 < |t| < 0,12 \text{ (ГэВ/С)}^2$ как для малых^{/5/}, так и для больших^{/6/} недостающих масс, показало (рис. 2), что сечение монотонно уменьшается с ростом $|t|$, не проявляя заметной структуры.

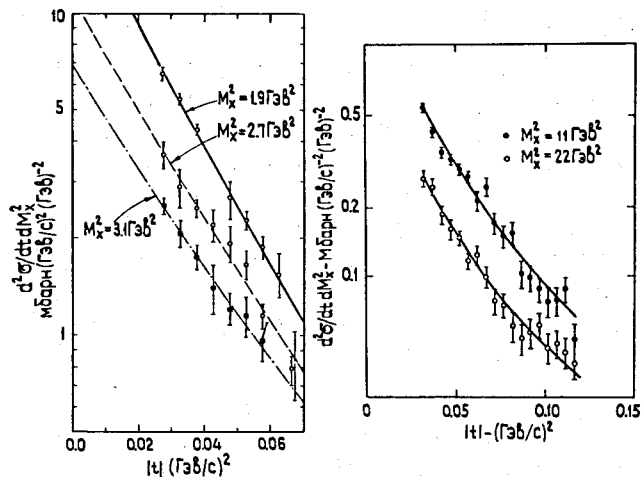


Рис.2
 t - зависимость
 дифференциальных
 сечений реакции
 $p d \rightarrow X d$ при
 $P=275$ ГэВ для
 различных значе-
 ний недостающих
 масс.

Кривыми на рис.2 представлен результат подгонки дифференциальных сечений по формуле

$$d\sigma/dt dM_x^2 = A \exp[-\beta_d(|t|-a) + C_0(t^2 - a^2)] \quad (I)$$

при фиксированных $C_0 = 62,3$ (ГэВ/с)⁴ и $a = 0,035$ (ГэВ/с)². Особенно важно отметить отсутствие тенденции к уменьшению сечений при $|t| \rightarrow 0$, которая предсказывалась некоторыми вариантами теории. Здесь же подробно обсуждается теоретическая интерпретация измеренных в экспериментах ^{3,16/} корреляций между параметром наклона дифракционного конуса и массой возбужденной системы. Далее показано, что в области больших масс зависимость наклона (β - параметр) дифференциальных сечений от энергии налетающих протонов и массы возбужденной системы может быть качественно объяснена в рамках трёхреджеонного формализма ^{16/}.

Второй раздел посвящён анализу данных в области малых недостающих масс $M_x^2 < 5$ (ГэВ/с)² (рис.3). Обсуждается природа пиков в инклюзивном спектре масс, впервые обнаруженная в экспериментах ^{2,5/} благодаря высокой разрешающей способности аппаратуры. Показано ^{4,11/}, что основные черты диссоциации в этой области, такие, как зависимость сечения и β - параметра от энергии и недостающей массы, удаётся понять на основе модели Дрелла-Хидди-Дека (ДХД) с учётом абсорбтивных эффектов, связанных с перерассеянием частиц в начальном и конечном состояниях. "Тонкая структура" основного пика в массовом

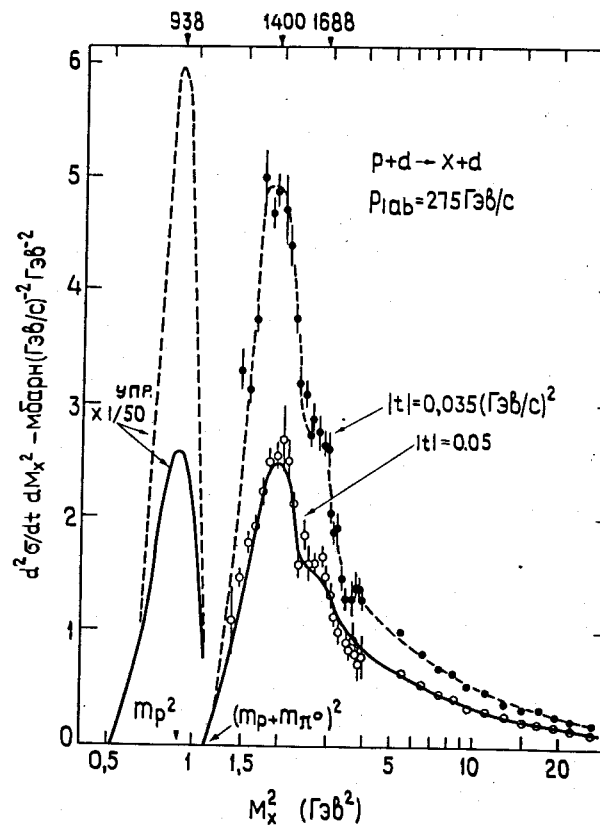


Рис.3
 Зависимость
 дифференциальных
 сечений от M_x^2
 и переданного
 импульса $|t|$.

спектре свидетельствует о наличии дополнительных резонансных вкладов, часть из которых, по-видимому, связана с вкладом резонансов, рождённых через механизм ДХД. Отмечается, что сечения неупругих взаимодействий в этой области масс, в пределах экспериментальных ошибок, факторизуются.

В третьем параграфе приводятся данные ^{1,6/} по диссоциации протонов в состоянии с большой массой $M_x^2 \gg 5$ (ГэВ/с)². В этой области сечения уже не проявляют резонансной структуры (см.рис.3) и сначала уменьшаются, следуя с высокой точностью закону $(1/M_x^2)$, а затем становятся независимыми от M_x^2 . Такое поведение сечений подтверждает доминантность дифракции в области $M_x^2 \leq 0,05 s$. В этом предположении получена верхняя оценка величины константы трёхреджеонного взаимодействия.

Измерения на одной и той же экспериментальной установке сечений

возбуждения больших и малых недостающих масс дают уникальную возможность воспользоваться гипотезой дуальности и проверить правила сумм при фиксированной массе, выведенные на основе дисперсионных соотношений.

$$i\pi \frac{dG_{el}}{dt} + \int \bar{\nu} \frac{d^2\sigma}{dt d\nu} d\nu = \int \bar{\nu} \left[\frac{d^2\sigma}{dt d\nu} \right]_{TR} d\nu \quad (2)$$

здесь $\nu = M_x^2 - t - m_p^2$, dG_{el}/dt - дифференциальное сечение упругого рассеяния $d^2\sigma/dt d\nu$ - сечения в резонансной области, $[d^2\sigma/dt d\nu]_{TR}$ - результат подгонки неупругого рассеяния в трёхреджеонной области, плавно экстраполированный к $\nu = 0$, $\bar{\nu}$ соответствует любому M_x^2 , расположенному между резонансами. Результат проверки^{/9/} представлен на рис.4: кривая I представляет значения

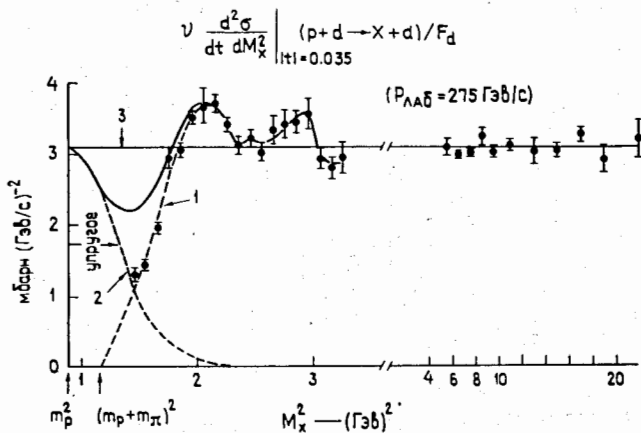


Рис.4

Результат проверки правил сумм при конечной массе.

$\nu d^2\sigma/dt d\nu$ в зависимости от M_x^2 , полученные из данных^{/5,6/}; 2 - упругое сечение, представленное для иллюстрации в виде распределения по Гауссу; 3 - результат трёхреджеонной подгонки, экстраполированной из области больших масс. Совпадение суммы площадей под кривыми I и 2 с площадью под сплошной кривой 3 в пределах 3% неопределённости в нормировке показывает, что правила сумм для первого момента выполняются с высокой степенью точности.

Далее в этом параграфе проводится сравнение результатов различных феноменологических анализов, основанных на трёхреджеонном формализме. При этом показана важность данных при малых переданных

импульсах, позволяющих показать, что нет указания на исчезновение $G_{PPP}(t)$ при $t \rightarrow 0$, провести оценку вклада дифракции в рост полных сечений^{/II/} и получить величину $G_{PPP}(0)$ и сечения померон-протонного взаимодействия. Рис.5 наглядно демонстрирует эффект роста G_D за счёт смещения с ростом энергии порога дифракционной диссоциации в сторону меньших $1-x$. Однако в феноменологическом под-

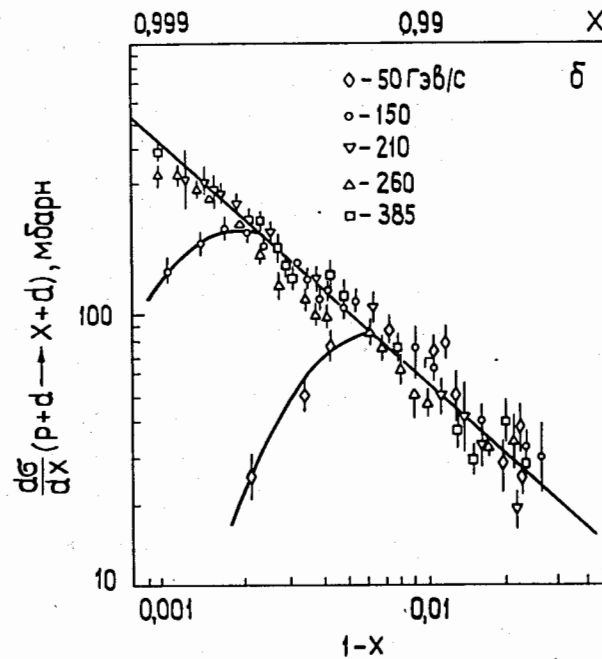


Рис.5

Зависимость дифференциальных сечений неупругих pd -взаимодействий от $1-x$ при разных энергиях налетающего протона.

ходе из-за большого числа свободных параметров нет возможности без модельных предположений выделить вклады отдельных реджеонов, ответственных за рождение и формирование возбуждённой системы. Результат беспараметрического описания экспериментальных данных^{/II/}, проведённого на основе кварк-реджеонной модели, приведён на рис.6. Такой анализ, кроме определения вкладов отдельных реджеонов (рис.7), указывает на важность учёта перекрёстных членов (PRP, RPP, PRR, RRR). При описании неупругих взаимодействий на кварковом языке были получены новые аргументы в пользу представлений о кварк-дикварковой структуре нуклонов.

Рис. 6

Описание экспериментальных сечений процесса $pp \rightarrow Xp$ с помощью кварк-реджеонной модели. Кривые: 1-симметричный кварковый вариант; 2-кварк-дикварковый вариант; 3-совпадающие решения для двух вариантов, в которых учитывается "сход с массовой поверхности" взаимодействующих кварков.

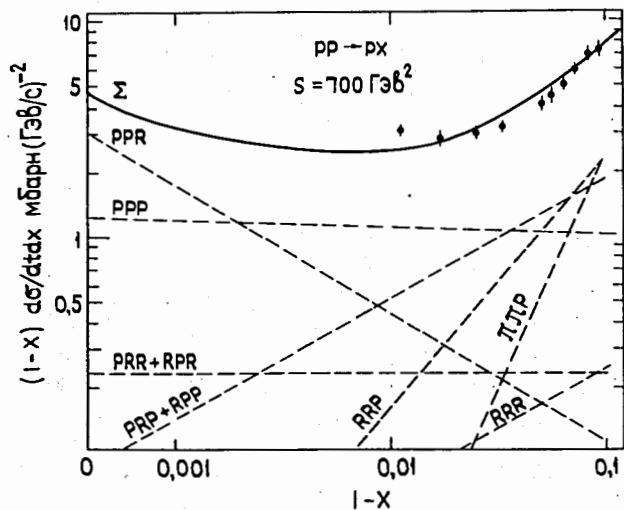
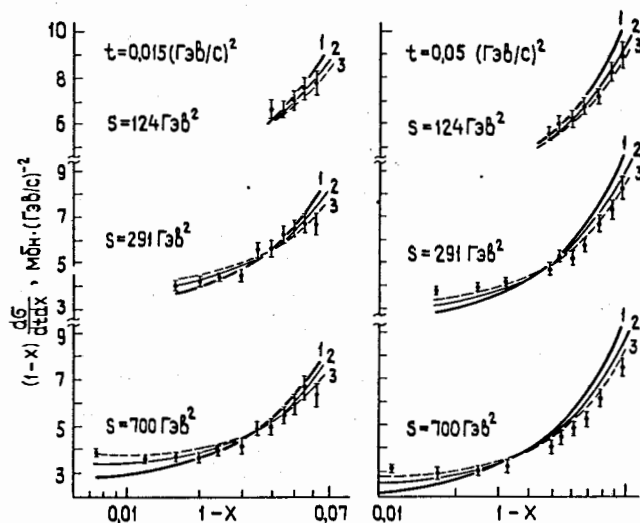


Рис. 7
Вклады различных обменов в инклюзивное сечение реакции $pp \rightarrow Xp$, вычисленные при $|t| = 0,05$ (ГэВ/c)²

В заключительной части раздела показано, что если рассматривать диссоциацию протонов в рамках теории с интерсептом больше единицы, то наблюдаемый при энергиях ISR фейнмановский скейлинг можно объяснить как результат компенсации убывающих с энергией вкладов в дифракцию растущим трехполюсным вкладом.

В последнем, четвертом параграфе этой главы, проводится сравнение результатов диссоциации протонов высокой энергии на водороде и дейтерии. Приводятся данные о дифференциальных сечениях dN/dx , полученные в одном сеансе при периодической смене газов (водорода и дейтерия) в струйной мишени, что позволило свести к минимуму возможные систематические ошибки при последующем анализе.

Показано, что если дейтрон рассматривать как элементарную частицу-адрон, то в области, где преобладают дифракционные процессы, сечения факторизуются в пределах экспериментальных ошибок, указывая на малость вклада изовекторных обменов при энергиях выше 100 ГэВ. На рис. 8 приведено сравнение $pd \rightarrow Xd$ взаимодействий с $pp \rightarrow Xp$ при примерно равных s для $|t| = 0,05$ (ГэВ/c)², в виде $dN/dx = (dG/dt dx)/(dG/dt)$ для разных $1-x$. Из рисунка видно выполнение

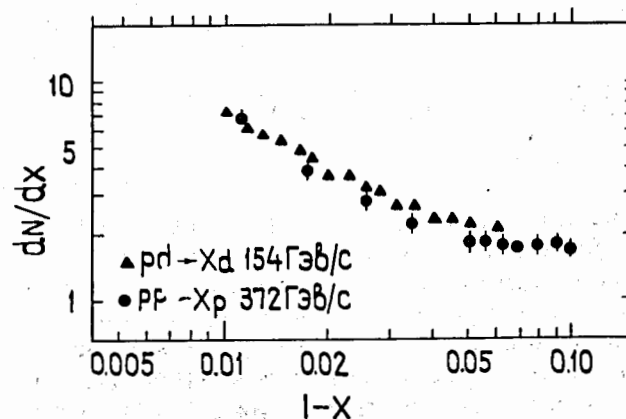


Рис. 8
Ядерная факторизация pp и инклюзивных сечений как функция $1-x$ при $|t| = 0,05$ (ГэВ/c)²

факторизации в пределах 5% в области $1-x \leq 0,06$. Таким образом, факторизуемый померонный обмен преобладает как в упругой, так и в неупругой дифракции [8], и отношение их сечений не зависит от типа мишени при одинаковых s .

На основе сравнения дифференциальных сечений pp и pd взаимодействий при одинаковой энергии налетающего адрона проведен анализ поправок на нерассеяние в дейтроне ($A \ln$) при неупругом взаимодействии.

На рис.9 представлено отношение

$$T(x) = \left[\frac{d^2G/dt dx}{dG_{el}/dt} \right]_{pp} / \left[\frac{d^2G/dt dx}{dG_{el}/dt} \right]_{pd} \approx \quad (3)$$

$$\approx 1 + \Delta_{in} - \Delta_{el} + \bar{\pi} \frac{dG_{el}^{pd}}{dt} / \left[\frac{dG_{el}^{pp}}{dt} \frac{d^2G^{pd}}{dt dx} \right]$$

для двух энергий в зависимости от I-x.

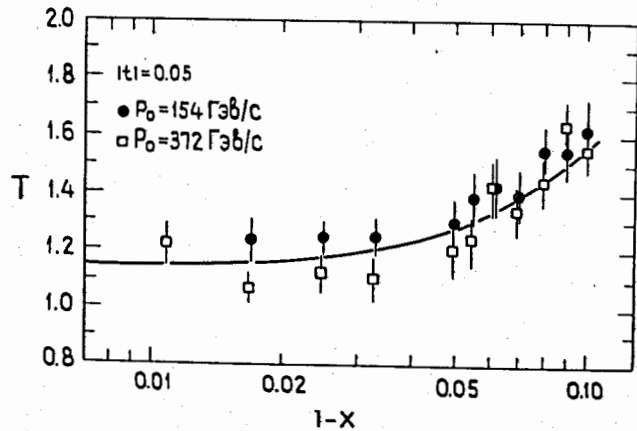


Рис.9
Зависимость от
(I-x) отношения
T(x).

Здесь $\bar{\pi}$ учитывает вклады изовекторных обменов в неупругое pp -рассеяние. Сплошной кривой показан результат расчёта T в предположении, что главным изоспинзависимым процессом является $\bar{\pi}$ -мезонный обмен типа $\bar{\pi}pP$ при $\Delta_{in} - \Delta_{el} = 0,14$. Таким образом, получено /10/, что поправка на перерассеяние в неупругом pd -рассеянии в два раза больше, чем в упругом, и не зависит от величины x . Показана важность учёта $\bar{\pi}$ -мезонного обмена для pp -взаимодействий в области больших величин I-x. Пользуясь традиционным подходом к анализу данных, при котором не учитываются двойные неупругие перерассеяния внутри дейтрона, можно связать Δ_{in} и полное сечение взаимодействия возбуждённой системы X со свободным нуклоном внутри дейтрона G_{XN} следующим выражением:

$$\Delta_{in} \approx \Delta_{el} \left(1 + \frac{G_{XN}}{G_{NN}} \right). \quad (4)$$

Вычисления по этой формуле для полученного в эксперименте $\Delta_{in} = 0,27$ дадут $G_{XN} = 28 \pm 10$ мбн. /10/, равное примерно половине G_{NN} и не зависящее от I-x. При этом такое маленькое значение G_{XN} по сравнению с G_{NN} можно рассматривать как указание на заметное пространственно-временное развитие рождённой системы X на типичных для ядер расстояниях.

Далее показано, что подходящей величиной, чувствительной к вкладу неупругих промежуточных состояний, является /13/

$$R(x,t) = 1 - \frac{d^2G^{pd \rightarrow Xd}/dt dx}{4S^2(t/4) d^2G^{pp \rightarrow Xp}/dt dx}, \quad (5)$$

в которой однократные рассеяния сокращаются. На рис.10 представлена зависимость R от I-x, вычисленная из экспериментальных данных /10/. Характерным является уменьшение R с ростом I-x с переходом через нуль при $I-x \approx 0,2$ и то, что величина I-x, при которой R меняет знак, не зависит от конкретной параметризации сечения реакции $pp \rightarrow Xp$.

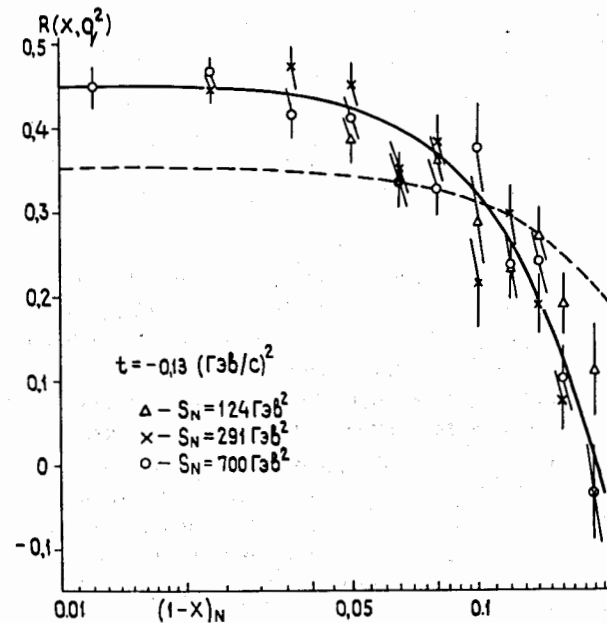


Рис.10
Поправки на двух-
кратные перерас-
сеяния в неупру-
гих pd -вза-
имодействиях.

Пунктирной кривой на рис.10 показан результат описания экспериментальных данных в предположении о равенстве относительных поправок на перерассеяние в упругом и неупругом рассеянии на дейтроне,

сплошная кривая соответствует отношению $G_{KN} / G_{NN} \approx 3,5$. Рис.10 демонстрирует экспериментальное доказательство существования явления антиэкранировки, возникающего за счёт двойного неупругого перерасеяния, которое с ростом I -х сначала уменьшает величину поправки на перерасеяние, а затем меняет её знак и подтверждает сделанный в первой главе теоретический вывод об отрицательном знаке мнимой части амплитуды неупругого рассеяния.

В последней, пятой главе перечисляются основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты настоящей работы можно сформулировать кратко в виде следующих выводов:

1. Развита и использована в экспериментах ранее не применявшийся для исследования неупругих процессов и оказавшийся эффективным метод регистрации частиц отдачи от струйной мишени, расположенной на внутреннем пучке ускорителя, позволивший получить рекордные разрешения по недостающей массе в инклюзивной постановке опытов. В процессе развития этого метода были:

- а) впервые применены телескопы из полупроводниковых детекторов /2,5/ для разделения частиц по массам;
- б) подвижная щель для улучшения массового разрешения /2/;
- в) подвижный экран для прямого измерения фона /10,12/;
- г) разработаны новые методы анализа /1,2,5,6,7,10/, позволившие не только учесть методические особенности, но и получить самые точные в мире данные по диссоциации протонов.

2. Впервые получена общая картина неупругого рассеяния протонов в области малых переданных импульсов /2,5,9/, изучено поведение инклюзивных дифференциальных сечений в зависимости от энергии налетающего протона, недостающей массы возбуждённой системы M_X и квадрата переданного четырёхимпульса t .

3. Надёжно выделена дифракционная компонента в неупругом рассеянии протонов, доминирующая при малых t и $M_X^2 \leq 0,1 m_p^2$.

4. Впервые показано, что в t - зависимости сечений вплоть до очень малых $|t| \approx 0,02$ (ГэВ/с)² отсутствует минимум при $t \rightarrow 0$ /2,5/. Тем самым экспериментально доказано, что неупругая дифракция может происходить при исчезающе малых значениях переданного импульса.

5. Благодаря высокому разрешению по недостающей массе удалось впервые проследить смещение с ростом энергий порога дифракционной диссоциации к меньшим M_X^2/s и тем самым наглядно продемонстрировать эффект роста полного сечения неупругой дифракции с увеличением энергии.

Имеющиеся в настоящее время данные позволяют считать, что не существует ограничений на величину массы дифракционно возбуждённой системы при условии, что энергия сталкивающихся частиц достаточно велика. Таким образом, с ростом энергии становится возможным дифракционное возбуждение всё больших масс, и дифракционная диссоциация оказывается одним из наиболее важных каналов, вклад которой в полное сечение соизмерим с вкладом упругого рассеяния.

6. В области малых недостающих масс $M_X^2 \leq 4$ ГэВ² в инклюзивном спектре впервые была обнаружена /5,6/ тонкая структура и измерена её зависимость от энергии и переданного импульса. Сравнение этих результатов с данными из эксклюзивных процессов привело к заключению о двухкомпонентной природе спектра в области малых масс /11,12/, что свидетельствует о наличии как резонансных, так и нерезонансных состояний возбуждённой системы и важной роли абсорбционных эффектов в диссоциации. Сильное поглощение при малых прицельных параметрах приводит к периферичности профиля дифракционной диссоциации. Абсорбтивные поправки существенно уменьшают величину сечения. В результате затравочная трёхмерная вершина может оказаться в несколько раз больше извлекаемой из эксперимента эффективной вершины. Надёжная оценка этих эффектов является одной из важнейших задач теории.

7. Показано /1,2,10/, что в области масс $5 \leq M_X^2 \leq 0,1 m_p^2$ ГэВ² сечение не проявляет резонансной структуры и с высокой точностью подчиняется закону $1/M_X^2$. Подобное поведение свидетельствует о существенном вкладе трёхмерного взаимодействия в этой области масс /3,8,9,12/, играющего фундаментальную роль в асимптотической теории дифракции.

8. В рамках кварковой модели впервые удалось описать E, t и M_X^2 зависимости сечений диссоциации протонов в области промежуточных и больших масс без введения свободных параметров /14/, определить вклады различных обменных механизмов, ответственных за рождение и формирование возбуждённой адронной системы, и объяснить обнаруженное в экспериментах /1,2/ заметное отклонение от масштабной инвариантности. Получено указание на предпочтительность кварк-дикварковой структуры в протоне.

9. Совместный анализ диссоциации в области малых и больших масс и высокая статистическая обеспеченность данных позволили установить связь между возбуждением малых и больших масс и показать, что дуальность в форме дисперсионных правил сумм выполняется с высокой степенью точности /9,12/.

10. Сопоставление сечений упругого рассеяния и дифракционной диссоциации на водороде и дейтерии позволило впервые установить выполнение ядерной факторизации^{/2,5/} и показать, что факторизуемый обмен доминирует как в упругом^{/7/}, так и неупругом рассеянии^{/1,6/}.

11. Показано^{/13/}, что описание адрон-ядерных взаимодействий в области малых t методом собственных состояний и с помощью глауберовского формализма с учётом всех неупругих перерассеяний даёт одинаковые результаты и, следовательно, последнее правильно отражает пространственно-временную картину взаимодействия.

12. В результате прямого сравнения сечений диссоциации протонов на водороде и дейтерии найдено^{/10/}, что глауберовские поправки в неупругом рассеянии в два раза больше, чем в упругом, а при анализе взаимодействий на водороде в области $M_X^2/s \geq 0,05$ необходимо учитывать π - мезонный обмен, запрещённый по изоспину в дейтронном рассеянии.

13. При анализе поведения отношения сечений диссоциации на дейтерии и водороде в зависимости от M_X^2/s в рамках кварк-партоновой модели показано^{/13/}, что эффективная амплитуда неупругого рассеяния имеет отрицательную мнимую часть. Отрицательный знак амплитуды неупругой дифракции приводит к тому, что ряд фейнмановских графиков в дифракционных процессах на ядрах имеет аномальный знак. Так вклад двухкратной неупругой дифракции имеет характер антиэкранировки. Этот вывод подтверждён анализом экспериментальных данных реакции $pd \rightarrow Xd$.

14. Впервые получено экспериментальное указание^{/16/} на сужение конуса дифференциального сечения неупругого рассеяния с ростом M_X^2/s .

Результаты, вошедшие в диссертацию,
опубликованы в работах:

1. Y. Akimov, L. Golovanov, S. Mukhin et. al., Proton-Deuteron Elastic Scattering and Diffraction Dissociation from 50 to 400 GeV/c. (Протон-дейтронное упругое рассеяние и дифракционная диссоциация при энергиях от 50 до 400 ГэВ/с). NAL-Conf.-74/56-EXP, 1974.
2. Y. Akimov, L. Golovanov, S. Mukhin et. al., Excitation of the Proton to Low Mass States at 180 and 270 GeV. (Диссоциация протонов в состоянии с малой массой при 180 и 270 ГэВ). NAL-Conf-74/66 EXP, 1974.

3. Y. Akimov, L. Golovanov, S. Mukhin et. al., An Analysis of Proton Deuteron Interactions at Fermilab Energies. (Анализ протон-дейтронных взаимодействий при энергиях Лаборатории им. Ферми). FERMILAB-Conf-74/79-THY/EXP, Batavia, 1974.
4. S. V. Mukhin, V. A. Tsarev, Recent Results on Nucleon Diffractive Dissociation. (Новые результаты по дифракционной диссоциации) In: Proc of the 1974 Williamsburg Meeting of the Division of Particles and Field of the A.P.S. N.Y. A.I.P., 1975, p.263.
5. Y. Akimov, L. Golovanov, S. Mukhin et. al. Excitation of High Energy Protons into Low Mass States in p-d Interactions. (Диссоциация протонов высоких энергий в состоянии с малой массой в p-d взаимодействиях). Phys.Rev.Lett., 1975, v.35, p.763
6. Y. Akimov, R. Cool, ..., S. Mukhin et. al. Diffraction Dissociation of High Energy Protons in p-d Interactions. (Дифракционная диссоциация протонов высокой энергии в p-d взаимодействиях). Phys.Rev.Lett., 1975, v.35, p.766.
7. Y. Akimov, L. Golovanov, ..., S. Mukhin et. al., Proton-Deuteron Elastic Scattering at Small Momentum Transfer from 50 to 400 GeV/c. (Протон-дейтронное упругое рассеяние при малых переданных импульсах в области от 50 до 400 ГэВ/с) Phys.Rev., 1975, v.12, p.3399; 1977, v.15, p.2040E.
8. S. V. Mukhin, High Mass Diffraction Excitation of Protons on Protons and Deuterons. (Дифракционное возбуждение протонов в состоянии с большой массой на протонах и дейтронах). In: Proc. XVII Intern. Conf. on High-Energy Phys., Tbilisi, 1976, v.1, p.A1-3.
9. Y. Akimov, L. Golovanov, S. Mukhin et. al., Analysis of Diffractive pd-Xd and pp-Xp Interactions and Test of the Finite-Mass Sum Rule. (Анализ дифракционных pd - Xd и pp - Xp взаимодействий и проверка правил сумм при конечной массе). Phys.Rev. D, 1976, v.14, p.3148.
10. Y. Akimov, V. Bartenev, ..., S. Mukhin et. al., Diffraction Dissociation of High-Energy Protons on Hydrogen and Deuterium Targets. (Дифракционная диссоциация протонов высокой энергии на водородной и дейтериевой мишенях). Phys.Rev.Lett., 1977, v.39, p.1432, 1978, v.40, p.1159E
11. С.В.Мухин, В.А.Царёв, Дифракционное возбуждение протонов на протонах и дейтронах при высоких энергиях и малых переданных импульсах, ЭЧАЯ, 1977, т.8, с.989.

12. С.В.Мухин, pp- и pd - взаимодействия при высоких энергиях. Материалы VI Школы ИТЭФ. Элементарные частицы, выпуск I, М., Атомиздат, 1979.
13. А.Б.Замолотчиков, Б.З.Копелиович, Л.И.Лапидус, С.В.Мухин. Явление антиэкранирования в неупругой дифракции адронов на ядрах. ЖЭТФ, 1979, т.77, с.451.
14. С.В.Мухин, В.А.Царёв. Дифракционное возбуждение нуклонов в состоянии с большой массой и модель кварков. ЯФ, 1979, т.30, с.1680.
15. В.П.Зотов, С.В.Мухин, В.А.Царёв. Трёхреджеонные вершины в кварк-глюонной модели. Краткие сообщ.физ., 1979, т.8, с.25.
16. Y.K.Akimov, V.D.Bartenev, ..., S.Mukhin et.al., Slope Parameter for the Differential Cross-Section for the Reaction $p+d \rightarrow X+d$ in the Region of Small Momentum Transfer at Fermilab Energies. (Параметр наклона дифференциальных сечений реакции $p+d \rightarrow X+d$ в области малых переданных импульсов при энергиях Лаборатории им.Ферми).
FERMILAB-Conf-80/56-EXP, 1980

Рукопись поступила в издательский отдел
6 сентября 1983 года