

81695

Л-641



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2007-100

На правах рукописи

УДК 539.171.016

539.172.138.5

539.12.01

ЛИТВИНЕНКО

Анатолий Григорьевич

ИЗУЧЕНИЕ СПИНОВЫХ И ИЗСПИНОВЫХ
ЭФФЕКТОВ В РЕАКЦИЯХ РОЖДЕНИЯ
КУМУЛЯТИВНЫХ ЧАСТИЦ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Объединенный институт
ядерных исследований
Дубна 2007
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор	Виктор Викторович ГЛАГОЛЕВ
доктор физико-математических наук	Александр Михайлович СНИГИРЕВ
доктор физико-математических наук	Алексей Валентинович СТАВИНСКИЙ


Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт ядерных исследований РАН, г.Москва

Защита диссертации состоится “___” _____ 2007 года
в “___” часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.02
в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядер-
ных исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” _____ 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник


В.А.Арефьев

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Исследования кумулятивного рождения частиц, т.е. частиц, рождение которых запрещено законами сохранения в столкновениях свободных нуклонов, являются важным источником информации о характере взаимодействия и внутренней структуре сталкивающихся объектов, одним из которых обязательно должно быть ядро. В таких столкновениях возникают частицы с импульсами, которым соответствуют значения масштабной переменной X_c , превышающие единицу. Физически это означает участие в процессе взаимодействия конфигурации, когда два (или больше) нуклона фрагментирующего ядра находятся на расстояниях меньших, чем характерные расстояния между нуклонами. К настоящему времени структура атомных ядер на расстояниях, меньших или сравнимых с размерами нуклона (≤ 1 фм), изучена недостаточно как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения. Поэтому получение дополнительных экспериментальных данных о закономерностях рождения кумулятивных частиц представляет интерес как с точки зрения получения информации о структуре ядер на малых межнуклонных расстояниях, так и с точки зрения понимания механизмов реакции.

При этом изучение поляризационных наблюдаемых дает более детальную, по сравнению с реакциями с неполяризованными частицами, информацию о гамильтониане взаимодействия, механизмах реакции и структуре частиц, участвующих в реакции. Дейтрон из всех ядер представляет особый интерес: во-первых, это наиболее изученное ядро как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения. Во-вторых, для дейтрона, как для простейшего ядра, легче разобраться с механизмами реакции. В-третьих, дейтрон имеет нетривиальную спиновую структуру (спин, равный 1, и ненулевой квадрупольный момент), предоставляющую широкие экспериментальные возможности для изучения спиновых наблюдаемых.

Экспериментальные данные по тензорной анализирующей способности A_{yy} реакции фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы в переднюю полусферу, представленные в диссертационной работе, связаны с такими не до конца исследованными

теоретическими вопросами, как описание связанных состояний в системе релятивистских частиц, описание взаимодействия нуклонов на малых расстояниях, и с возможным проявлением ненуклонных степеней свободы в ядрах, а потому представляются актуальными.

Полученные экспериментальные данные позволяют продвинуться в понимании спиновой структуры дейтрона на малых межнуклонных расстояниях и дополняют информацию о структуре дейтрона, полученную в экспериментах с лептонным пробником и при изучении реакции развала тензорно поляризованных дейтронов. Проведенный теоретический анализ позволил выявить специфические особенности поляризационных наблюдаемых для реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в пионы и существенно сузить круг моделей, которые могут претендовать на описание процессов рождения кумулятивных частиц.

Целью работы являлось получение экспериментальных данных о закономерностях рождения кумулятивных частиц в столкновении протонов и ядер с фрагментирующим ядром. В частности, получение экспериментальных данных:

- о зависимости изотопического эффекта для кумулятивных пионов от атомной массы налетающего ядра;
- о зависимости изотопического эффекта для кумулятивных пионов от масштабной переменной.

Эти данные позволяют получить дополнительную информацию о механизме рождения кумулятивных частиц. Для получения более определенных выводов из экспериментальных данных в диссертационной работе также проведены оценки вклада от распадов кумулятивных ρ - и Δ -резонансов в спектры кумулятивных протонов и пионов./ Проведены также оценки вкладов в спектры кумулятивных протонов и пионов от распадов кумулятивных ρ - и Δ -резонансов.

Для получения информации о механизме рождения кумулятивных частиц ставилась задача получения зависимости сечений рождения и формы спектра кумулятивных частиц от атомной массы ядра мишени при фрагментации налетающих дейтронов в кумулятивные пионы. Эти экспериментальные данные позволяют сделать выводы о длине формирования пионов в средних и тяжелых ядрах и, таким образом,

прояснить вопросы взаимодействия пионов с ядрами.

Для получения информации о спиновой структуре дейтрона и механизмах рождения кумулятивных частиц ставилась задача получения экспериментальных данных по тензорной анализирующей способности реакции $\vec{d} + A \rightarrow \pi^\pm(\Theta > 90^\circ) + X$ фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные (подпороговые) пионы в переднюю полусферу на различных мишенях, при различных углах регистрации пионов, для различных энергий налетающих дейтронов и различных значений масштабной переменной.

Целью работы являлась также проверка адекватности теоретического описания поляризационных наблюдаемых и спектров кумулятивных пионов в вышеуказанной реакции для широкого набора волновых функций и схем релятивизации.

Научная новизна работы.

1. Получены единственные на настоящий момент экспериментальные данные по тензорной анализирующей способности A_{yy} реакции фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы, испущенные в переднюю полусферу (см. [A7], [A9], [A11], [A12], [A13], [A15], [A16]).
2. Впервые получены экспериментальные данные по зависимости изотопического эффекта для пионов от атомной массы ядра, на котором происходит фрагментация. Показано, что изотопический эффект проявляется и при фрагментации на ядрах с нулевым изоспином (см. [A3]).
3. Впервые получены экспериментальные данные, указывающие на существование изотопического эффекта в реакции рождения кумулятивных пионов при фрагментации мишеней из разделенных изотопов (см. [A3]).
4. Впервые получена зависимость сечений рождения кумулятивных пионов при фрагментации дейтронов от атомной массы ядра, на котором происходит фрагментация, включая водород. Эти данные позволили оценить длину формирования пионов, которая для средних и тяжелых ядер составила величину порядка 3,5 ферми (см. [A2]).

5. Впервые получены оценки сверху сечений рождения кумулятивных ρ - и Δ -резонансов, а также вкладов частиц от распадов этих резонансов в спектры кумулятивных пионов и протонов. Экспериментальные данные для рождения кумулятивных ρ и Δ отсутствуют (см. [A5]).
6. Впервые измерена величина тензорной анализирующей способности T_{20} в реакции $\vec{d} + A \rightarrow \pi^\pm (\Theta = 0^\circ) + X$ фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы под нулевым углом [A7], [A9], [A12], [A13].
7. Впервые проведены расчеты сечений и поляризационных наблюдаемых для реакции фрагментации дейтронов в пионы с использованием широкого набора волновых функций дейтрона (см. [A4], [A8], [A9], [A10], [A14]).

Следует отметить, что данные по зависимости изотопического эффекта в рождении кумулятивных пионов и данные для тензорной анализирующей способности A_{yy} реакции фрагментации дейтронов в пионы до настоящего времени являются единственными.

Научно-практическая значимость работы.

В настоящее время вопросы описания реакций с участием релятивистских составных частиц исследованы недостаточно как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения.

Так, в принципе, имеющиеся теоретические модели описывают экспериментальные данные для сечений рождения кумулятивных частиц в случае неполяризованных дейтронов. Однако существуют не до конца понятные эффекты, такие как зависимость от атомной массы фрагментирующего ядра, в том числе изотопический эффект. Представленные в диссертационной работе экспериментальные данные для зависимости сечений рождения кумулятивных пионов от ядра, на котором происходит фрагментация, накладывают ограничения на выбор моделей, которые могут быть предложены для детального описания механизмов рождения кумулятивных частиц. Кроме того, экспериментальные данные по зависимости сечений рождения кумулятивных пионов от атомной массы ядра, на котором происходит фрагментация, дают информацию о длине формирования пионов

в ядрах. Эта информация необходима для понимания закономерностей взаимодействия адронов с ядрами. Некоторая часть теоретических моделей оказалась непригодна для понимания поведения тензорной анализирующей способности T_{20} и коэффициента передачи поляризации κ в реакции фрагментации поляризованных дейтронов в протоны, другая часть потребовала серьезной доработки. Так, эмпирический учет ненуклонных степеней свободы в структуре дейтрона на малых расстояниях позволил понять экспериментальные данные по T_{20} и κ до значений внутреннего импульса нуклона в дейтроне $\sim 0,5$ ГэВ/с, а также получить ограничение на величину T_{20} при асимптотически больших внутренних импульсах, мотивированное КХД. Важно отметить, что представленные в диссертационной работе данные по тензорной анализирующей способности A_{yy} реакции фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы в переднюю полусферу не описываются ни одной из известных моделей.

Таким образом, полученные данные представляются существенными для дальнейшего развития моделей, как предназначенных для описания структуры кора дейтрона, так и для более общего случая связанных систем составных объектов, движущихся с релятивистскими скоростями.

Следует отметить, что представленные данные по A_{yy} на настоящий момент являются единственными, поскольку для проведения такого рода измерений необходимы пучки поляризованных дейтронов с энергией в несколько ГэВ. Более того, в ближайшие несколько лет данные по спиновой структуре дейтронного кора в экспериментах с адронным пробником могут быть получены только на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ.

Апробация работы и публикации. Результаты, лежащие в основе диссертационной работы, были получены в составе международной коллаборации и докладывались на семинарах по релятивистской ядерной физике ЛВЭ ОИЯИ, международных рабочих совещаниях, конференциях и симпозиумах (см. [I]-[XIX]).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах [A1]-[A16].

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 181 странице, состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений, содержит 96 рисунков, 28 таблиц и список цитируемой литературы из 202 наименований.

На защиту выносятся

1. Программа исследований, процедуры измерений и обработки и экспериментальные данные, указывающие на существование изотопического эффекта в реакции рождения кумулятивных пионов при фрагментации разделенных изотопов [A3].
2. Результаты исследования зависимости изотопического эффекта от типа ядра, на котором происходит фрагментация. Из этих экспериментальных данных следует, что величина изотопического эффекта не зависит от ядра, на котором происходит фрагментация, в том числе эффект проявляется и при фрагментации на ядрах с нулевым изоспином [A3].
3. Экспериментальные данные по зависимости изотопического эффекта от кумулятивного числа [A3]. Из этих экспериментальных данных следует, что величина изотопического эффекта не зависит от масштабной кумулятивной переменной в исследованной области $0,59 < X_c(\pi) < 1,38$.
4. Экспериментальные данные по зависимости сечений рождения кумулятивных пионов при фрагментации дейтронов от атомной массы ядра, на котором происходит фрагментация, в т.ч. на водороде. Эти данные позволили оценить длину формирования пионов, которая для средних и тяжелых ядер составила величину порядка 3,5 ферми [A2].
5. Оценки сверху для сечений рождения кумулятивных ρ - и Δ -резонансов, а также для вкладов частиц от распадов этих резонансов в спектры кумулятивных пионов и протонов [A5].
6. Программа и процедура измерений, а также экспериментальные данные для величины тензорной анализирующей способности T_{20} в реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы под нулевым углом в двух постановках [A1], [A6], [A7], [A11], [A12]:
 - при фиксированном импульсе пионов $p_\pi = 3,0$ ГэВ/с для импульсов дейтронов p_d в интервале от 6,2 до 9,0 ГэВ/с;

- при фиксированном импульсе дейтронов $p_d = 9,0$ ГэВ/с для импульсов пионов p_π в интервале от 3,5 до 5,3 ГэВ/с.
7. Заключение о том, что измеренная величина тензорной анализирующей способности T_{20} не зависит от атомной массы A ядра мишени в интервале $A = 1 \div 12$.
 8. Заключение о том, что измеренная величина T_{20} не зависит от знака регистрируемого пиона.
 9. Заключение о том, что измеренная величина T_{20} даже качественно не описывается известными на данный момент теоретическими расчетами в импульсном приближении в нуклонной модели дейтрона [A4], [A5], [A8], [A9], [A10], [A14].
 10. Экспериментальные данные по величине тензорной анализирующей способности A_{yy} в реакции $\vec{d} + A \rightarrow \pi^\pm (\Theta = 135, 180 \text{ мрад}) + X$ фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы. Для угла 180 мрад данные получены для двух значений импульса дейтрона p_d : 5 и 9 ГэВ/с [A9], [A13], [A15], [A16]. Измеренная величина A_{yy} совместно с данными, полученными под нулевым углом, указывает на то, что:
 - скейлинг по кумулятивной переменной, установленный ранее для сечений рождения кумулятивных частиц, нарушается, что выражается в существенной зависимости A_{yy} от поперечного импульса кумулятивного пиона;
 - тензорная анализирующая способность A_{yy} в реакциях рождения кумулятивных протонов и пионов имеет разный знак и обнаруживает качественно различное поведение в зависимости от кумулятивной переменной. Это указывает на нарушение суперскейлинга для спиновых наблюдаемых в реакциях рождения кумулятивных частиц.
 11. Результаты расчетов сечений и поляризационных наблюдаемых для реакции фрагментации дейтронов в пионы с использованием широкого набора волновых функций дейтрона [A4], [A8], [A9], [A10], [A14]. Из этих расчетов следует, что:
 - сечение рождения и поляризационные наблюдаемые не описываются импульсным приближением в рамках нуклонной

модели;

- сечение рождения кумулятивных пионов чувствительно к выбору вида вершины $NN \rightarrow \pi X$;
- тензорная анализирующая способность T_{20} слабо зависит от выбора вида вершины $NN \rightarrow \pi X$;
- применение схемы минимальной релятивизации улучшает описание экспериментальных данных для сечения рождения кумулятивных пионов;
- тензорная анализирующая способность T_{20} чувствительна к выбору волновой функции дейтрона;
- экспериментальные данные для A_{yy} не описываются нулевой моделью в импульсном приближении при рассмотрении большого набора общепринятых волновых функций дейтрона.

12. Результаты анализа проявления ненуклонных степеней свободы в волновой функции дейтрона. Такой учет приводит к более жесткому распределению по внутреннему импульсу в волновой функции дейтрона. Из сравнения проведенных расчетов с экспериментальными данными следует, что:

- введение 2 ÷ 4 % примеси ненуклонной компоненты позволяет описать экспериментальные данные для сечений фрагментации дейтронов в кумулятивные пионы;
- экспериментальные данные для тензорной анализирующей способности T_{20} в рамках рассмотренной схемы учета ненуклонных степеней свободы не описываются. Это может указывать или на неприменимость импульсного приближения, или на необходимость использовать более совершенную схему релятивизации.

Содержание диссертации

Во введении дан краткий обзор современного состояния исследований реакций рождения кумулятивных частиц. Целью этой части диссертации является:

- ввести и разъяснить основные понятия и определения, которые традиционно используются при анализе реакций рождения кумулятивных частиц;

- ознакомить читателя с состоянием экспериментальных и теоретических исследований в рассматриваемой области и тем самым дать представление о месте и роли результатов, представленных в диссертационной работе.

В первой главе приведено описание экспериментальных установок ДИСК - 2 и переднего детектора установки СФЕРА, которые использовались для получения обсуждаемых в диссертации экспериментальных данных. Описаны условия измерений, организация триггера и процедуры обработки. Обсуждаются результаты моделирования и методических измерений.

Во второй главе представлены экспериментальные данные для сечений рождения кумулятивных частиц в протон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях.

В первом параграфе обсуждаются понятия "изотопического" и "изотонического" эффектов в реакциях рождения кумулятивных частиц. Впервые эти эффекты были обнаружены в рождении кумулятивных протонов (изотопический эффект) и, несколько позднее, нейтронов (изотонический эффект) (см. [1], [2], [3], [4]). Указанные эффекты состоят в том, что сечения рождения кумулятивных протонов и нейтронов зависят не только от числа нуклонов во фрагментирующем ядре, но и от содержания в нем протонов и нейтронов. Поскольку изотопический (изотонический) эффект был обнаружен при фрагментации изотопов под действием пучка протонов и при фрагментации мишеней из изотопов в кумулятивные протоны и нейтроны, то была предложена и реализована программа измерений, призванная ответить на следующие вопросы:

1. Существует ли изотопический эффект для других кумулятивных частиц (отличных от протонов и нейтронов)?
2. Как изотопический эффект зависит от изоспина ядра, на котором происходит фрагментация? В частности, существует ли изотопический эффект при фрагментации на ядрах с нулевым изоспином?

В рамках реализации предложенной программы были получены экспериментальные данные для сечений реакции

$$A_r(p = 4, 5 \text{ ГэВ}/(c \cdot \text{нуклон})) + A_t = c(\Theta = 120^\circ) + X \quad (1)$$

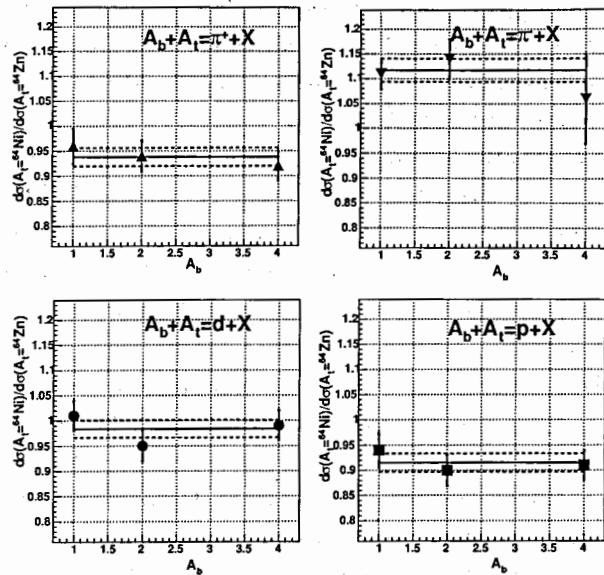


Рис. 1: Отношение нормированных на нуклон сечений рождения π^\pm , протонов и дейтронов при фрагментации изотопов ^{64}Zn и ^{64}Ni в зависимости от типа налетающей частицы A_b .

Кумулятивными частицами s были дейтроны, протоны и π^\pm , а пучковыми частицами A_r , которые в такой постановке играют роль частицы, на которой происходит фрагментация, были протоны $A_r = p$, дейтроны $A_r = d$ и альфа-частицы $A_r = {}^4\text{He}$. Ядра мишеней в такой постановке играют роль фрагментирующего ядра. Использовался широкий набор мишеней, включая мишени из разделенных изотопов. Данные были получены на установке ДИСК-2, описанной в главе 1 диссертационной работы. Полученные данные указывают на то, что сечения рождения пионов зависят от нейтронного и протонного содержания фрагментирующего ядра. Это означает, что изотопический (изотонический) эффект проявляется и для реакций рождения кумулятивных пионов. Зависимость изотопического эффекта от состава налетающего ядра показана на Рис. 1. В диссертационной работе представлены данные для сечений рождения кумулятивных частиц при фрагментации изотопов ^{64}Ni , ^{64}Zn , ^{58}Ni , ^{114}Sn , ^{124}Sn и для ми-

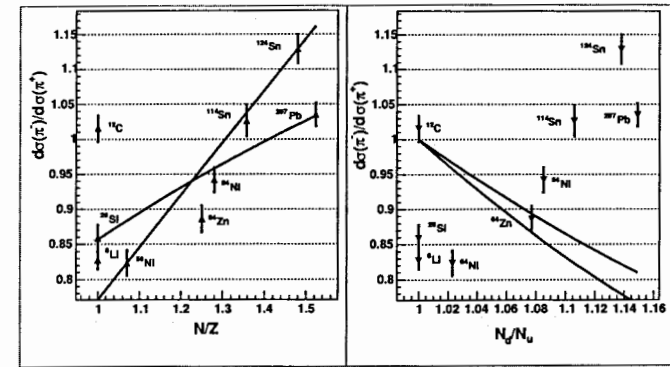


Рис. 2: Зависимость отношения сечений рождения отрицательных и положительных пионов $d\sigma(\pi^-)/d\sigma(\pi^+)$ от: (слева) отношения чисел нейтронов и протонов N/Z во фрагментирующем ядре; (справа) отношения чисел валентных d - и u -кварков N_d/N_u во фрагментирующем ядре. Линии задают границы теоретического описания отношения $d\sigma(\pi^-)/d\sigma(\pi^+)$ в рамках: (слева) нуклонной модели флуктона в предположении, что сечения рождения пионов разных знаков имеют разную величину в протон-нейтронных и протон-протонных столкновениях; (справа) модели, учитывающей ненуклонные степени свободы (см. [5]).

шеней, являющихся естественной смесью элементов. Полученные сечения рождения сведены в таблицы, представленные в приложении II диссертационной работы. Результаты измерений (см. Рис. 1) позволяют сделать следующие выводы:

1. изотопический эффект проявляется и при рождении кумулятивных пионов (см. Рис. 1);
2. для набора ядер, на которых происходит фрагментация (p , дейтроны и альфа-частицы), в пределах экспериментальных ошибок не наблюдается зависимость изотопического эффекта от ядра на котором происходит фрагментация./ в пределах экспериментальных ошибок не наблюдается зависимость изотопического эффекта от ядра, на котором происходит фрагментация, для исследованного набора таких ядер – p , дейтроны и

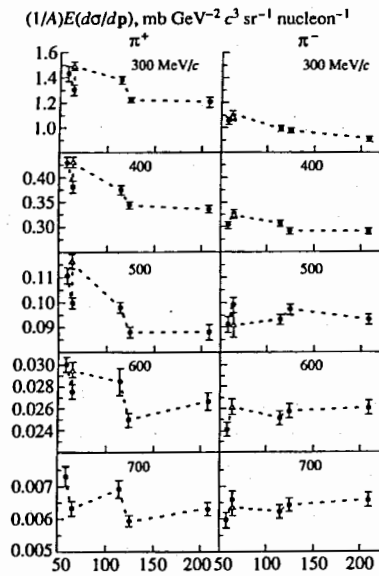


Рис. 3: Зависимость нормированных на нуклон сечений рождения пионов от атомной массы фрагментирующего ядра для разных импульсов π^\pm .

альфа-частицы. Следовательно, можно заключить, что величина изотопического эффекта определяется изотопическим составом фрагментирующего ядра.

В рамках моделей, традиционно используемых для объяснения рождения кумулятивных частиц, не удастся объяснить изотопический эффект и, в частности, отношения выходов заряженных пионов для всей области исследованных ядер. Это утверждение иллюстрируется на Рис. 2 на данной стадии понимания закономерностей рождения кумулятивных частиц экспериментальные данные не описываются ни в рамках нуклонной модели, ни в рамках моделей, учитывающих вклад ненуклонной компоненты. Это означает, что полученные данные по зависимости сечений рождения кумулятивных частиц от ядра, на котором происходит фрагментация, указывают на необходимость доработки и детализации имеющихся теоретических подходов.

Во втором параграфе приведены данные о зависимости изотопического эффекта от импульса (степени подпороговости) детектируе-

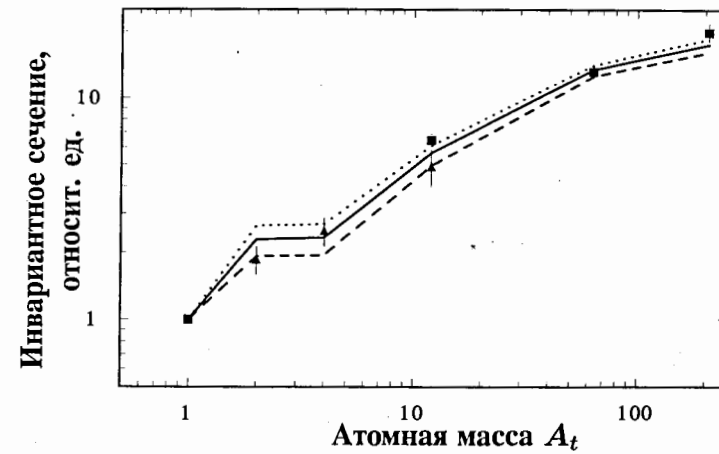
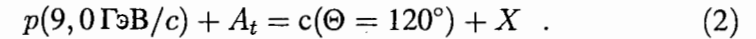


Рис. 4: Экспериментальные данные по зависимости сечений рождения кумулятивных пионов от атомной массы ядра, на котором происходит фрагментация. Квадраты – обсуждаемые данные, треугольники – данные по реакции (2) для фрагментации ядер углерода. Линии – результат описания по предложенной в диссертации модели для $A_t = \text{H, D, } ^4\text{He, C, Cu, Pb}$ для разных значений длины формирования l_π : сплошная – $l_\pi = 3,5$ фм; пунктирная – $l_\pi = 2,5$ фм; штриховая – $l_\pi = 4,5$ фм.

мого адрона c в реакции



В измерениях использовался широкий набор мишеней, включая мишени из разделенных изотопов. Таблицы с данными для инвариантных инклюзивных сечений представлены в приложении II диссертационной работы. Результаты измерений показаны на Рис. 3. Из полученных данных следует, что для реакции (2) изотопический эффект наблюдается для π^\pm -мезонов в интервале импульсов от 0,3 до до 0,7 ГэВ/с. Указанный интервал импульсов отвечает значениям масштабной кумулятивной переменной $0,59 < X_c < 1,38$.

В третьем параграфе обсуждаются данные по зависимости сечения фрагментации дейтерия в π^- -мезоны от атомной массы ядра, на котором происходит фрагментация. Измерения проводились для реакции

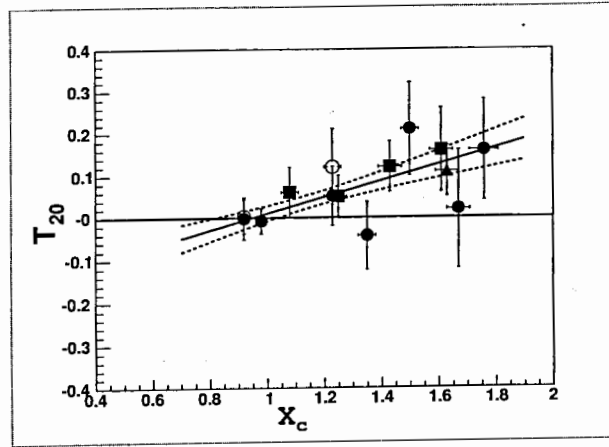


Рис. 5: Зависимость от кумулятивного числа X_c тензорной анализирующей способности T_{20} для реакции (4): открытые кружки – π^+ , мишень С; закрытые кружки – π^- , мишень С; закрытые треугольники – π^- , мишень Ве; закрытые квадраты – π^- , мишень Н; сплошная линия – результат фитирования всех данных линейной зависимостью $T_{20} = a_0 + a_1 \cdot X_c$; пунктирные линии показывают “коридор ошибок”.

$$d(9 \text{ ГэВ}/c) + A_t \rightarrow \pi^-(0^\circ) + X \quad (3)$$

на мишенях $A_t = \text{H, C, Cu, Pb}$.

В результате получено, что спектры кумулятивных π^- подобны при фрагментации всех использованных мишеней, а зависимость инклюзивных сечений от атомной массы ядра, на котором происходит фрагментация, в области средних и тяжелых ядер имеет периферический характер $d\sigma \propto A_t^{0.4}$. Особенность такой постановки эксперимента заключается в том, что зависимость сечений от атомной массы ядра мишени оказывается чувствительной к длине формирования кумулятивных пионов. Полученные экспериментальные данные и оценки длины формирования показаны на Рис. 4.

Подобие спектров π^- -мезонов при фрагментации дейтронов на различных ядрах, наряду с полученными оценками длины формиро-

вания, необходимо учитывать в моделях, рассматривающих процессы перерасеяния кумулятивной частицы в сталкивающихся ядрах.

В четвертом параграфе представлены оценки сверху сечений рождения кумулятивных ρ_0 -мезонов и Δ^{++} -изобар. Экспериментальные данные для сечений рождения кумулятивных резонансов к настоящему времени отсутствуют. В свою очередь, знание вкладов от распадов резонансов в спектры кумулятивных адронов необходимо при интерпретации экспериментальных данных. В результате моделирования получено, что примесь в спектры кумулятивных частиц распадных частиц не превышает 1%. Предложенный подход основан на учете экспериментальных закономерностей, установленных при изучении инклюзивных сечений рождения кумулятивных частиц, и применим к любым резонансам, а не только к ρ_0 и Δ^{++} .

В третьей главе описана процедура получения экспериментальных данных по тензорной анализирующей способности T_{20} реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы

$$\vec{d} + A \rightarrow \pi^\pm(\Theta = 0^\circ) + X, \quad (4)$$

обсуждаются условия постановки эксперимента и точности измерений – систематические и статистические ошибки, а также приведены окончательные экспериментальные данные.

В первом параграфе изложена экспериментальная программа [1] изучения тензорной анализирующей способности T_{20} реакций фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные адроны, основанная на имеющихся экспериментальных данных о рождении кумулятивных адронов в столкновениях неполяризованных частиц, данных по поляризационным наблюдаемым в реакции развала поляризованных дейтронов и на теоретических моделях, предложенных для описания указанных реакций. Изучение поляризационных наблюдаемых в реакции $\vec{d} + A \rightarrow \pi^\pm(\Theta = 0^\circ) + X$ фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы – адроны с кварковым составом, отличным от состава протонов – может дать дополнительную информацию о структуре дейтрона на малых расстояниях, в пользу чего можно привести следующие аргументы:

- взаимодействие в конечном состоянии меняется с изменением

типа вторичной частицы, что несет дополнительную информацию о механизме рождения кумулятивных частиц;

- регистрация частиц под нулевым углом позволяет упростить выражение для сечения и избежать поправок на наличие векторной компоненты поляризации в первичном тензорно поляризованном пучке дейтронов;
- различные кварковые составы протона и пионов позволяют сделать выбор между различными моделями, учитывающими ненулевые степени свободы в ядрах, на основании экспериментальных данных по T_{20} для кумулятивных протона и пионов.

Во втором параграфе проведен анализ источников систематических ошибок, описана постановка эксперимента, изложены условия проведения измерений. Измерения тензорной анализирующей способности T_{20} реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы под нулевым углом проводились на канале 4В системы медленного вывода Синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ. Пучок тензорно поляризованных дейтронов создавался источником ПОЛЯРИС [6], а его тензорная поляризация измерялась с помощью поляриметра АЛЬФА [7].

Измерения проводились в следующих условиях:

1. время вывода пучка составляло $400 \div 500$ мсек;
2. частота повторений $\sim 0,1$ Гц;
3. интенсивность в интервале от $1 \cdot 10^9$ до $5 \cdot 10^9$ дейтронов за сброс;
4. величина тензорной поляризации пучка дейтронов составляла $p_{zz} \approx 0,60 \div 0,77$, слабо (не более чем на 10 %) меняясь в пределах данной серии измерений, а примесь векторной поляризации составляла $p_z \approx 0,20 \div 0,25$;
5. ось квантования для поляризации направлена вертикально;
6. обеспечивались три состояния поляризации – “+” (положительный знак поляризации), “-” (отрицательный знак поляризации), “0” (отсутствие поляризации), менявшиеся каждый цикл ускорителя, так что в трех последовательных циклах пучок имел различные состояния поляризации.

Первая постановка эксперимента позволяла уверенно выделять пионы, используя критерий времени пролета на базе 74 м, и за

счет наличия шести отклоняющих магнитов иметь пренебрежимо малое (меньше чем 10^{-4}) отношение фон/сигнал для времяпролетных спектров даже на положительно заряженных частицах. Подавление же протонов (на два порядка) в триггере с помощью черенковского счетчика использовалось для уменьшения мертвого времени. Использовались углеродные мишени ($50,4$ г/см² и $23,5$ г/см²). Экспериментальные данные в первой постановке набирались только при одном значении импульса пионов (3,0 ГэВ/с), выделяемом каналом 4В, а увеличение степени их подпороговости достигалось за счет уменьшения импульса первичных дейтронов.

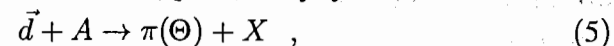
Во второй серии измерений данные набирались в несколько иной конфигурации установки с мишенью, расположенной в фокусе F5 (далее – “вторая постановка”), что увеличило число пионов, достигающих фокуса F6 без распада, с 55 % до 85 % и позволило оперативно менять их импульс, выделяемый каналом 4В.

Измерения второй серии были проведены с водородной (7 г/см²), бериллиевой (36 г/см²) и углеродной (55 г/см²) мишенями.

В третьем параграфе приведены полученные экспериментальные данные для тензорной анализирующей способности T_{20} . Данные представлены на Рис. 5 в зависимости от кумулятивной масштабной переменной.

Возможности описания этих данных в рамках импульсного приближения рассматриваются в главе 5 диссертационной работы.

В четвертой главе представлены экспериментальные данные по тензорной анализирующей способности A_{yy} реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы



испущенные в переднюю полусферу $\Theta_\pi < 90^\circ$. Обсуждаются условия постановки эксперимента и точности измерений – систематические и статистические ошибки, приведены окончательные экспериментальные данные.

В первом параграфе обсуждается мотивация излагаемых ниже измерений. Эта мотивация опирается как на экспериментальные данные по T_{20} , приведенные в главе 3 диссертационной работы, так и на

экспериментальные данные по A_{yy} для реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные протоны под углом 85 мрад (в системе фрагментации пучка дейтронов) [8]. Поскольку экспериментальные данные для T_{20} не описываются в рамках нулевой модели дейтрона в кумулятивной области, представлялось естественным расширить кинематическую область исследования поляризованных наблюдаемых для реакции фрагментации дейтронов в кумулятивные пионы (заметим, что под нулевым углом имеется связь $T_{20} = -\sqrt{2}A_{yy}$).

Кроме того, как отмечалось в работе [8], данные для A_{yy} в реакции фрагментации дейтронов в кумулятивные протоны под ненулевым углом более чувствительны к выбору схемы релятивизации ВФД. Так, при отходе от коллинеарной кинематики реакции возникает вопрос о выборе направления оси конуса светового фронта, которая является фиксированной в схеме минимальной релятивизации и совпадает как с направлением движения дейтрона, так и с направлением движения детектируемой частицы. В случае же измерений под ненулевым углом направление движения детектируемого адрона не совпадает с направлением движения дейтрона, и вопрос о выборе направления оси светового фронта нуждается в дополнительном обосновании.

Приводимые в главе 4 экспериментальные результаты призваны дать дополнительную информацию о структуре дейтрона и ограничить круг моделей, которые используются при описании реакций рождения кумулятивных частиц, т.е. реакций, для которых существенны большие внутренние импульсы (малые межнуклонные расстояния).

Во втором параграфе описана процедура измерений и проведен анализ систематических ошибок при измерении тензорной анализирующей способности A_{yy} . Из-за конечного углового аксептанса и расходимости пучка вклад в число зарегистрированных частиц могут давать все слагаемые, входящие в уравнение для сечения рождения пионов поляризованными дейтронами:

$$\sigma = \sigma_0 [1 + 2iT_{11}\text{Re}(it_{11}) + T_{20}t_{20} + 2T_{21}\text{Re}(t_{21}) + 2T_{22}\text{Re}(t_{22})] . \quad (6)$$

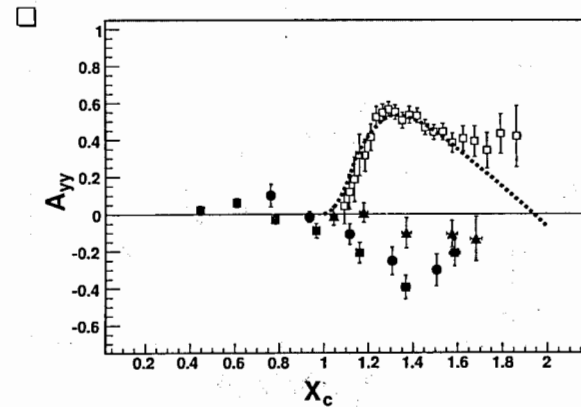


Рис. 6: Зависимость тензорной анализирующей способности A_{yy} от кумулятивной масштабной переменной X_c . Круги — $p_d = 9,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 135$ мрад; закрытые квадраты — $p_d = 9,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 180$ мрад; треугольники вершиной вверх — $p_d = 9,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 0$; треугольники вершиной вниз — $p_d = 5,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 180$ мрад. открытые квадраты — для реакции фрагментации дейтронов в протоны под нулевым углом, кривая — результаты расчета по модели из [19].

Из результатов моделирования было получено, что в пределах точности не хуже 1 % для выбранной геометрии эксперимента число пионов, зарегистрированное для пучка дейтронов с векторной поляризацией p_ζ и тензорной $p_{\zeta\zeta}$ дается выражением:

$$N = N_0 \left(1 + \frac{3}{2}A_y p_\zeta + \frac{1}{2}A_{yy} p_{\zeta\zeta} \right) , \quad (7)$$

где N_0 — нормированное на монитор число частиц, зарегистрированных для неполяризованного пучка. В (7) использована связь:

$$A_{yy} = -\frac{1}{\sqrt{2}}T_{20} - \sqrt{3}T_{22} . \quad (8)$$

Измерения проводились при трех состояниях тензорной поляризации $p_{\zeta\zeta}^+$, $p_{\zeta\zeta}^-$ и $p_{\zeta\zeta} = 0$, (“+”, “-”, “0”), последовательно менявшихся от цикла к циклу. Соответствующие значения векторной и тензорной анализирующих способностей, вычисленные из (7), даются следующими выражениями:

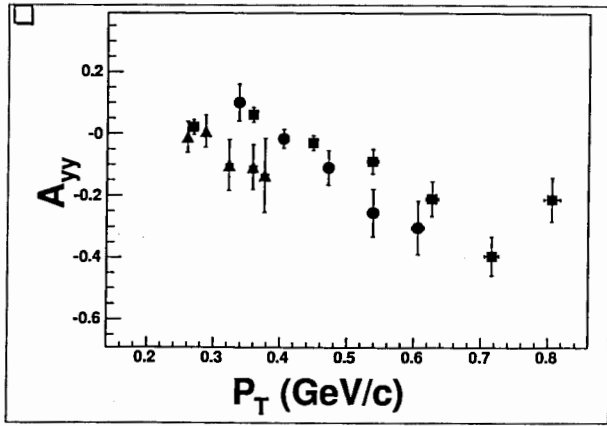


Рис. 7: Зависимость тензорной анализирующей способности A_{yy} от поперечного импульса кумулятивных пионов P_T . Кружки – $p_d = 9,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 135$ мрад; квадраты – $p_d = 9,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 180$ мрад; треугольники – $p_d = 5,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 180$ мрад.

$$A_y = -\frac{2}{3} \left(\frac{1}{p_\zeta^- p_\zeta^+ - p_\zeta^+ p_\zeta^-} \right) \left(\frac{p_{\zeta\zeta}^- (N^+ - N^0) - p_{\zeta\zeta}^+ (N^- - N^0)}{N^0} \right), \quad (9)$$

$$A_{yy} = 2 \left(\frac{1}{p_\zeta^- p_\zeta^+ - p_\zeta^+ p_\zeta^-} \right) \left(\frac{p_\zeta^- (N^+ - N^0) - p_\zeta^+ (N^- - N^0)}{N^0} \right), \quad (10)$$

где $N^{+,-,0}$ – число зарегистрированных пионов для данной моды поляризации, нормированное на соответствующий монитор. Типичные значения тензорной и векторной поляризации при измерении под разными углами составляли:

$$\begin{aligned} p_{\zeta\zeta}^+ &= 0,63 \pm 0,04; & p_\zeta^+ &= 0,19 \pm 0,02; \\ p_{\zeta\zeta}^- &= -0,72 \pm 0,04; & p_\zeta^- &= 0,21 \pm 0,02. \end{aligned} \quad (11)$$

Ошибка A_{yy} , связанная с точностью измерения поляризации пучка, в этих условиях составляет $6 \div 8$ %.

В третьем параграфе представлены экспериментальные данные по тензорной анализирующей способности A_{yy} для реакции $d + \text{Be} = \pi^- (\Theta_\pi) + X$. Данные получены для следующих импульсов дейтронов и значений угла регистрации пионов:

- $p_d = 9,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 135$ мрад;

- $p_d = 9,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 180$ мрад;
- $p_d = 5,0$ ГэВ/с, $\Theta_\pi = 180$ мрад.

Зависимость полученной величины тензорной анализирующей способности A_{yy} от кумулятивной масштабной переменной X_c показана на Рис. 6. Из этого рисунка видно, что зависимость A_{yy} от X_c не является универсальной. Это, в частности, выражается в том, что имеется существенная зависимость A_{yy} от поперечного импульса пиона, что наглядно показано на Рис. 7.

В пятой главе представлены результаты детального анализа процесса фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы. В рамках релятивистского импульсного приближения инклюзивный спектр пионов и тензорные анализирующие способности T_{20} и A_{yy} рассчитаны с использованием различных схем релятивизации и для различных волновых функций дейтрона (ВФД), в том числе – содержащих P -волновую компоненту.

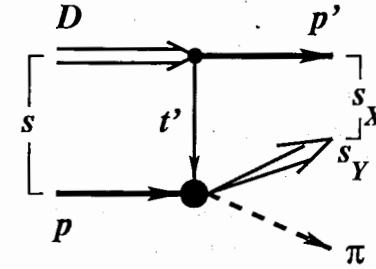


Рис. 8: Диаграмма импульсного приближения для рождения пионов в реакции $p + D \rightarrow \pi + X$.

В первом параграфе обсуждаются имевшиеся до получения экспериментальных данных расчеты, в также обсуждается подход, выбранный для описания релятивистских эффектов.

До получения экспериментальных данных по тензорным анализирующим способностям T_{20} и A_{yy} реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы, представленных в диссертационной работе, существовали расчеты [9] для T_{20} в рамках нуклонной модели. Однако эти расчеты проведены в рамках одной модели дейтрона, которая используется только ее авторами. Поэтому

представлялось актуальным проанализировать представленные данные, как с использованием различных схем релятивизации, так и с использованием различных ВФД. При этом с самого начала ставилась задача описания реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы последовательно релятивистским образом, используя нуклонную модель дейтрона с различными ВФД. Для этого в рамках формализма Бете–Солпитера (БС) записываются полностью ковариантные выражения для всех наблюдаемых. Такой подход позволяет делать общие заключения об амплитуде процесса, а нерелятивистский предел без труда вычисляется.

Во введении к диссертационной работе отмечалось, что имеется большое количество моделей, в которых сечения рождения кумулятивных частиц описываются с помощью введения в волновую функцию фрагментирующего ядра ненуклонных степеней свободы. Тем не менее, последовательное включение в рассмотрение ненуклонных степеней свободы должно проводиться после учета вклада от нуклонных степеней свободы. Поэтому один из возможных вариантов учета ненуклонных степеней свободы проведен после последовательного рассмотрения результатов, к которым приводит нуклонная модель для различных ВФД и различных схем релятивизации. Таким образом, излагаемый в данной главе анализ является необходимым шагом для теоретического изучения реакций кумулятивного рождения и учета возможного вклада в наблюдаемые для такого рода реакций от ненуклонных степеней свободы в дейтроне.

Во втором параграфе изложен формализм релятивистского импульсного приближения, который использовался для расчета сечений и тензорных анализирующих способностей. Расчет проводился для прямого механизма рождения пионов, т.е. на основе диаграммы, показанной на Рис. 8.

Используя релятивистский подход, опирающийся на амплитуды Бете–Солпитера, в диссертационной работе получены выражения для сечений рождения и тензорных анализирующих способностей для реакции фрагментации дейтронов в пионы. В компактной форме спектр пионов $E d\sigma/d\vec{p} = \rho_0(pD \rightarrow \pi)$ и тензорная анализирующая способность A_{yy} представляются в виде:

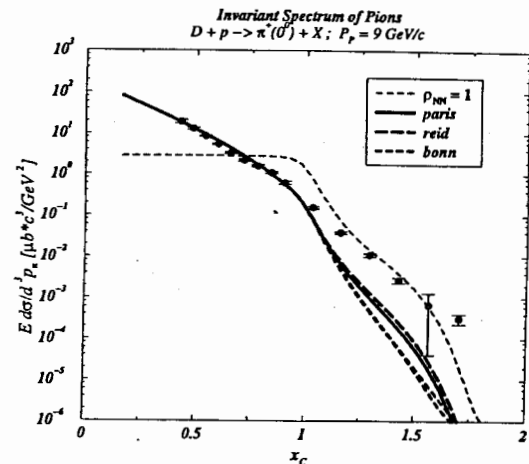


Рис. 9: Инклюзивный спектр пионов реакции $p + D \rightarrow \pi + X$ при $P_p = 9$ ГэВ/с и угле вылета пионов $\vartheta_\pi = 180^\circ$ в системе покоя дейтрона, вычисленный в рамках релятивистского импульсного приближения с использованием различных форм нерелятивистской ВФД. Сплошная, штрихпунктирная и штриховая линии – вычисления с парижской [11], боннской [12] ВФД и ВФД Рейда [13], соответственно. Тонкая штриховая линия – расчет в предположении независимости спектра элементарного процесса $NN \rightarrow \pi Y$ от любых релятивистски-инвариантных переменных ($\rho(NN \rightarrow \pi) = 1$) для парижской ВФД. Экспериментальные данные взяты из работы [10].

$$\rho_0(pD \rightarrow \pi) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \sqrt{\frac{\lambda(p, n)}{\lambda(p, D)}} [\rho(pN \rightarrow \pi) \cdot \Phi^{(u)}(|\vec{q}|)] \frac{m^2 d^3 q}{E_{\vec{q}}}; \quad (12)$$

$$\rho_0(pD \rightarrow \pi) \cdot A_{yy} = -\frac{1}{(2\pi)^3} \int \frac{\sqrt{\lambda(p, n)}}{\sqrt{\lambda(p, D)}} [\rho(pN \rightarrow \pi) \cdot \Phi^{(t)}(|\vec{q}|)] \left(\frac{3 \cos^2 \vartheta_{\vec{q}} - 1}{2} \right) \frac{m^2 d^3 q}{E_{\vec{q}}}; \quad (13)$$

где функции $\Phi^{(u)}(|\vec{q}|)$ и $\Phi^{(t)}(|\vec{q}|)$ записываются в терминах дейтронных парциальных волн следующим образом:

$$\Phi^{(u)}(|\vec{q}|) = \mathcal{N}^{-2} \frac{M_D^2}{m^2} \{U^2 + W^2 - V_t^2 - V_s^2 +$$

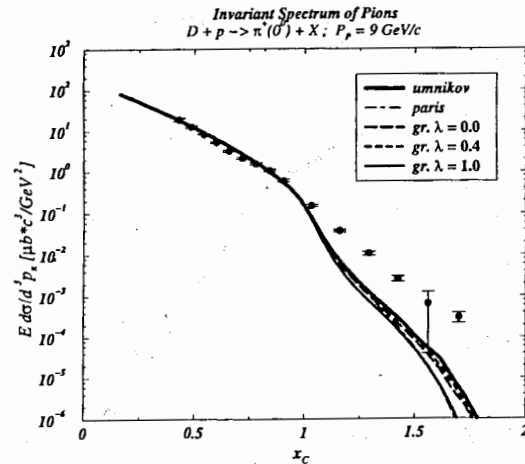


Рис. 10: Результаты расчета инклюзивного спектра пионов для ВФД, содержащих P -волну. Сплошная толстая линия соответствует вычислениям с ВФД [14], где величина $P_V \simeq 0,2\%$. Сплошная тонкая, штриховая и штрихпунктирная линии представляют расчеты с использованием ВФД Гросса [15] при различной вероятности содержания малых компонент в дейтроне $P_V = 0,03\%$, $0,44\%$ и $1,46\%$, соответственно. Штриховая линия с двумя точками – расчет с парижской нерелятивистской ВФД [11]. Экспериментальные данные из [10].

$$+ \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{|\vec{q}|}{m} \left\{ (\sqrt{2}V_t - V_s)U - (V_t + \sqrt{2}V_s)W \right\}; \quad (14)$$

$$\Phi^{(t)}(|\vec{q}|) = \mathcal{N}^{-2} \frac{M_D^2}{m^2} \left\{ 2\sqrt{2}UW + W^2 + V_t^2 - 2V_s^2 - \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{|\vec{q}|}{m} \left[\left(U - \frac{W}{\sqrt{2}} \right) \frac{V_t}{\sqrt{2}} + (U + \sqrt{2}W)V_s \right] \right\}. \quad (15)$$

В третьем параграфе приведены результаты расчета сечения рождения кумулятивных пионов. На Рис. 9–11 показаны экспериментальные данные из работы [10] и результаты расчетов с широким набором ВФД. Результаты расчетов сечений рождения кумулятивных пионов с аппроксимацией элементарного сечения из работы [18] для нерелятивистских ВФД приведены на Рис. 9. Чтобы показать, на-

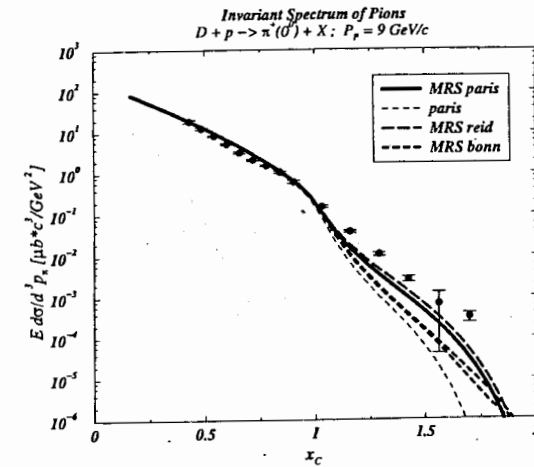


Рис. 11: Инклюзивный спектр пионов, вычисленный в рамках схемы минимальной релятивизации (MRS) [16], [17] с использованием различных форм нерелятивистской ВФД: парижской [11] – сплошная линия, Рейда [13] – штриховая линия, два варианта боннской [12] – две жирных пунктирных линии. Расчеты с парижской ВФД без учета релятивистских эффектов показаны тонкой пунктирной линией. Экспериментальные данные из [10].

сколько данные чувствительны к выбору элементарного сечения, на том же рисунке приведены результаты расчетов с $\rho(pN \rightarrow \pi) = \text{const}$. На Рис. 10 представлены результаты расчетов для ВФД, содержащих примесь P -волны, которая возникает из-за учета релятивистских эффектов. Здесь, как и в нерелятивистском подходе, внутренний импульс принимается равным импульсу нуклона (в системе покоя дейтрона), в столкновении которого с первичным протоном рождается пион. Результаты расчета сечений в рамках схемы минимальной релятивизации (MRS) представлены на Рис. 11. Для того, чтобы наглядно показать влияние эффектов релятивизации, показаны также результаты расчетов с нерелятивистской парижской ВФД.

Из приведенных результатов расчета можно сделать следующие выводы:

1. Из расчетов с $\rho(pN \rightarrow \pi) = \text{const}$ (Рис. 9) следует, что сечение

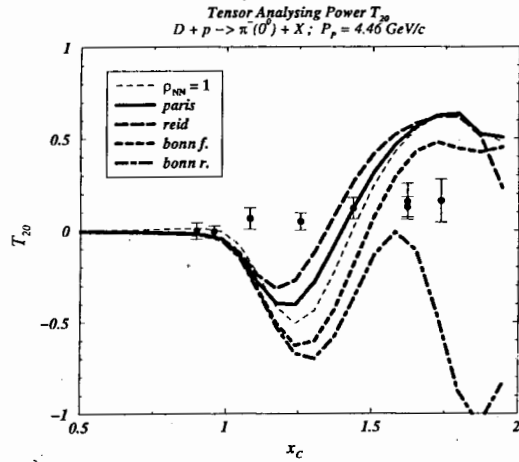


Рис. 12: Экспериментальные данные [A11] и теоретические расчеты для тензорной анализирующей способности T_{20} реакции $\vec{D} + p \rightarrow \pi(\vartheta_\pi = 0^\circ) + X$. Расчеты проведены в рамках релятивистского импульсного приближения с использованием различных форм нерелятивистской ВФД. Сплошная и штриховая линии – вычисления с парижской ВФД [11] и ВФД Рейда [13]. Штрихпунктирная линия и штриховая линия с двумя точками – расчеты с релятивистской и полной боннскими ВФД [12]. Тонкая штриховая линия – расчет в пренебрежении внутренней структурой элементарной вершины, $\rho(NN \rightarrow \pi) = 1$.

фрагментации дейтрона в пионы в кумулятивной и некумулятивной областях чувствительно к выбору зависимости элементарного сечения от соответствующих кинематических переменных.

2. В некумулятивной области $X_c < 1$ экспериментальные данные хорошо описываются импульсным приближением во всех рассмотренных подходах (Рис. 9÷11). Это говорит в пользу применимости импульсного приближения и выбранной аппроксимации сечения элементарного акта.
3. Расчеты с нерелятивистскими ВФД и расчеты с ВФД, учитывающими релятивистские эффекты включением P -волны (уравнение Бете–Солпитера, квазипотенциальный подход Гросса) не описывают экспериментальные данные по рождению кумулятив-

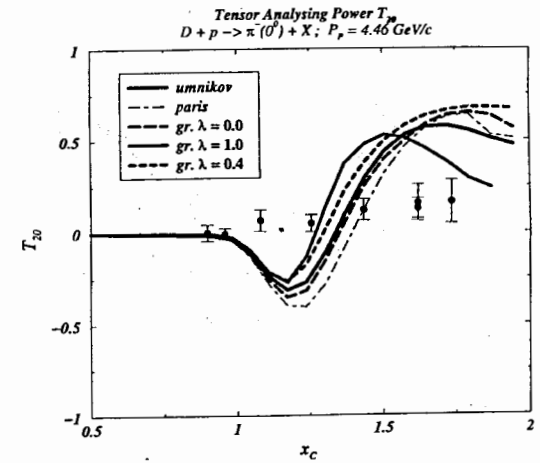


Рис. 13: Чувствительность T_{20} к вкладу P -волн дейтрона. Обозначения те же, что на Рис. 10. Экспериментальные данные из [A11].

ных пионов, уже начиная с $X_c \approx 1$ (см. Рис. 9÷10). Для $X_c \approx 1,5$ различие между экспериментальными данными и результатами расчетов превышает порядок. При этом результаты расчетов слабо зависят от выбора ВФД.

4. Применение схемы минимальной релятивизации заметно улучшает согласие теоретических расчетов и экспериментальных данных для $X_c \geq 1$. Однако экспериментальные данные не описываются и в схеме минимальной релятивизации ни одной из использованных ВФД. Что касается реакции фрагментации дейтронов в кумулятивные протоны, то для сечения этой реакции также было получено [19], что наилучшее описание экспериментальных сечений этой реакции достигается при использовании схемы минимальной релятивизации.

В четвертом параграфе обсуждаются результаты расчетов тензорных анализирующих способностей A_{yy} и T_{20} . Обратимся к обсуждению результатов расчета тензорной анализирующей способности T_{20} в реакции $\vec{D} + p \rightarrow \pi + X$ при угле вылета пионов $\vartheta_\pi = 0^\circ$, полученных в рамках релятивистского импульсного приближения.

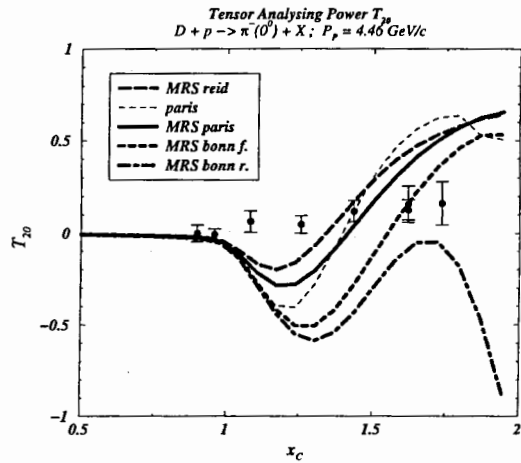


Рис. 14: Результаты расчета тензорной анализирующей способности T_{20} в рамках схемы минимальной релятивизации [16], [17] с использованием различных форм нерелятивистской ВФД: парижской [11] – сплошная линия, Рейда [13] – штриховая линия, и двух типов боннской ВФД [12], релятивистской – штрихпунктирная линия и полной – штриховая линия с двумя точками. Экспериментальные данные взяты из [A11].

На Рис. 12 представлены теоретические расчеты T_{20} и экспериментальные данные, которые обсуждались в главе 3 диссертационной работы. На Рис. 13 представлены результаты расчетов T_{20} для волновых функций дейтрона, содержащих примесь P -волны, которая возникает из-за учета релятивистских эффектов. Результаты расчетов T_{20} и A_{yy} в рамках схемы минимальной релятивизации представлены на Рис. 14–15. Для того, чтобы наглядно показать влияние эффектов релятивизации, на Рис. 13 и Рис. 14 показаны также результаты расчетов с нерелятивистской парижской волновой функцией в нерелятивистском подходе.

В пятом параграфе представлены результаты расчетов сечений и тензорной анализирующей способности с учетом ненуклонных степеней свободы. В ряде работ сечение рождения кумулятивных адронов описывалось, исходя из предположения, что в ВФД на малых меж-

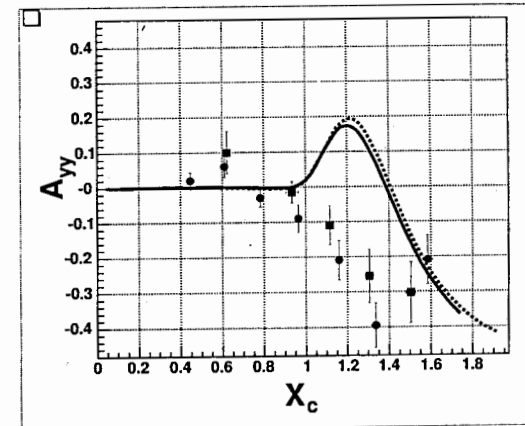


Рис. 15: Результаты расчета тензорной анализирующей способности A_{yy} в рамках схемы минимальной релятивизации для ВФД Рейда [13] для различных углов вылета пиона Θ_π : 135 град – сплошная линия, 180 град – пунктирная линия. Экспериментальные данные для Θ_π : 135 град – квадраты, 180 град – кружки.

нуклонных расстояний проявляются ненуклонные степени свободы (см. [19]–[21]). Изложен феноменологический подход, при котором ненуклонные степени свободы проявляются, в конечном итоге, в увеличении жесткости импульсного распределения в нуклоне.

Поведение высокоимпульсного “хвоста” в нуклонном распределении дейтрона может быть построено на основе правильной асимптотики Редже, аналогично тому, как это делалось в работе [22]. Это позволяет определить параметры функции распределения из экспериментальных данных об инклюзивном спектре протонов в реакции развала дейтрона $D+p \rightarrow p+X$ [22], [19]. Исходя из двухкомпонентной ВФД и следуя работам [22], [19], выбиралась следующая форма ВФД $\tilde{\Phi}^{(u)}(|\vec{k}|)$:

$$\tilde{\Phi}^{(u)}(|\vec{k}|) = \mathcal{N}^{-1} \frac{M_D^2}{m^2} \{ (1 - \alpha_{6q}) \cdot [U^2(|\vec{k}|) + W^2(|\vec{k}|)] + \alpha_{6q} \frac{4\pi x}{E_{\vec{q}}} \cdot G_{6q}(x, \vec{k}_\perp) \}, \quad (16)$$

где параметр α_{6q} есть вероятность существования в дейтроне ну-

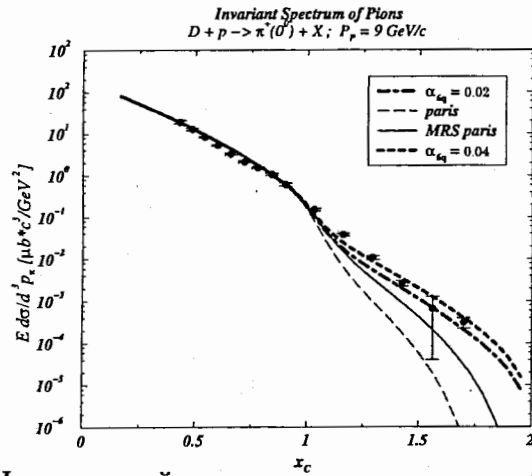


Рис. 16: Инклюзивный спектр пионов реакции $p + D \rightarrow \pi + X$ при $P_p = 9$ ГэВ/с и угле вылета пионов $\vartheta_\pi = 180^\circ$ в системе покоя дейтрона, вычисленный в рамках релятивистского импульсного приближения с учетом нуклонной компоненты в дейтроне (16) для различных величин примеси нуклонной компоненты α_{6q} к парижской ВФД [11]: $\alpha_{6q} = 0,02$ – жирная штрихпунктирная линия; $\alpha_{6q} = 0,04$ – жирная пунктирная линия. Сплошная линия – расчет с той же нерелятивистской ВФД в рамках схемы минимальной релятивизации. Тонкая штриховая линия – расчет с парижской ВФД в нерелятивистском подходе.

клонного состояния двух связанных бесцветных $3q$ -кластеров, а

$$G_{6q}(x, \vec{k}_\perp) = \frac{b^2}{2\pi} \cdot \frac{\Gamma(A+B+2)}{\Gamma(A+1)\Gamma(B+1)} \cdot x^A(1-x)^B \cdot e^{-bk_\perp}. \quad (17)$$

Результаты расчетов спектра и тензорной анализирующей способности T_{20} для такого выбора ВФД показаны на Рис. 16 и Рис. 17, соответственно. Из этих рисунков следует, что:

- в рамках описанной выше процедуры учета нуклонных степеней свободы удастся описать экспериментальные данные для спектра кумулятивных пионов, вводя величину примеси нуклонной компоненты порядка 4 %;
- экспериментальные данные для тензорной анализирующей способности T_{20} не описываются в рамках рассматриваемого под-

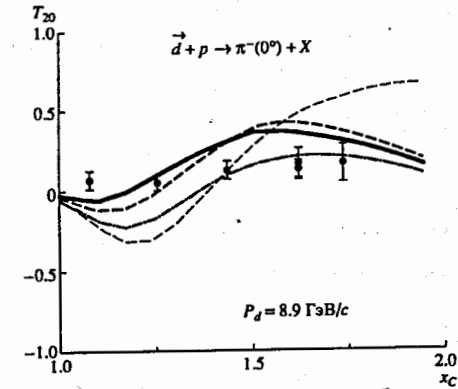


Рис. 17: Тензорная анализирующая способность T_{20} , вычисленная с учетом нуклонной компоненты [A4]. α_{6q} – вероятность существования в дейтроне нуклонного состояния двух связанных бесцветных $3q$ -кластеров, т.е. величина примеси в ВФД нуклонной компоненты. Сплошная линия – $a = 0$, $\alpha_{6q} = 3\%$; штриховая – $a = 0$, $\alpha_{6q} = 4\%$; штрихпунктирная – $a = 2,3$, $\alpha_{6q} = 3\%$; тонкая штриховая – расчет в схеме минимальной релятивизации с ВФД Рейда [13], $a = 0$, $\alpha_{6q} = 0$. Точки – экспериментальные данные из [A11].

хода.

В шестом параграфе обсуждаются результаты расчетов и возможные пути их улучшения. В частности, обсуждаются возможные изменения схемы вычислений, которая может улучшить согласие с экспериментальными данными по поляризационным наблюдаемым в реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы. Наряду с учетом дополнительных (к импульсному приближению) диаграмм обсуждается также использование более обоснованных схем релятивизации. В схеме минимальной релятивизации выбор направления конуса светового фронта фиксирован условием $z + t = 0$, а ось z направлена по первичному пучку.

В работах А.В.Карманова предложен более последовательный подход к описанию релятивистских связанных систем в динамике на световом фронте (см. работу [23] и ссылки в ней). В таком подходе направление светового фронта произвольно, а ВФД имеет бо-

лее сложную, чем для схемы минимальной релятивизации, структуру. В работе [24] подход Карманова использовался при описании экспериментальных данных по A_{yy} в реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в протоны под углом 178 мрад. В результате получено, что этот подход лучше описывает экспериментальные данные.

В заключении перечислены результаты, выносимые на защиту.

В приложении I приведены основные понятия, которые используются при описании реакций с участием частиц, имеющих спин 1 (см. [25], [26]). В частности, в соответствии с Мэдисоновской конвенцией (см. [27]) обсуждаются выбор координатных осей, определения поляризации ансамбля частиц со спином 1, анализирующих способностей и т.п. Цель этого приложения – облегчить знакомство с диссертационной работой, позволив читателю не прибегать к специальной литературе.

В приложении II приведены таблицы с экспериментальными данными для сечений рождения кумулятивных частиц, полученными при изучении изотопического эффекта в реакциях (1) и (2).

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и рабочих совещаниях:

- [I] A.G.Litvinenko et al. The Atomic Mass Dependence of the Cross Sections for the Reaction of Fragmentation Deuteron into Cumulative π^- -Meson. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, volume I of RNP'96, page 403, Sozopol, Bulgaria, (1996). JINR, Dubna, 1997.
- [II] V.K.Bondarev, A.G.Litvinenko, A.I.Malakhov, and S.G.Reznikov. A-Dependence of Cumulative Particle Production Cross Section. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, volume II of RNP'96, page 178, Sozopol, Bulgaria, (1996). JINR, Dubna, 1997.
- [III] A.G.Litvinenko. Manifestation of Nonnucleon Degrees of Freedom

in Nuclei in Reaction of the Cumulative Particle Production. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, RNP'98, page 90, Varna, Bulgaria, (1998). JINR, Dubna, 1998.

- [IV] Zolin L.S. et al. Fragmentation of Tensor Polarized Deuterons into Cumulative Pions. In *Proceedings of the 13th International Symposium on High Energy Spin Physics*, page 400, Protvino, Russia, (1999).
- [V] A.G.Litvinenko. Manifestation of Nonnucleon Degrees of Freedom in Nuclei in Reaction of the Cumulative Particle Production. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, RNP'99, page 15, Stara Lesna, Slovakia, (1999). JINR, Dubna, 1999.
- [VI] A.G.Litvinenko, A.Yu.Illarionov, and G.I.Lykasov. Study of Reaction of Deuteron Fragmentation into Cumulative Pions. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, RNP'2000, page 124, Stara Lesna, Slovakia, (2000). JINR, Dubna, 2000.
- [VII] L.S.Zolin et al. Deuteron beam polarimetry at LHE accelerator facility. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, RNP'2000, page 227, Stara Lesna, Slovakia, (2000). JINR, Dubna, 2000.
- [VIII] Migulina I.I. et al. Monte-Carlo simulation of experimental setup used in experiment with polarized deuterons. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, RNP'2000, page 261, Stara Lesna, Slovakia, (2000). JINR, Dubna, 2000.
- [IX] Г.С.Аверичев и др. Установка СФЕРА – спектрометр для изучения множественного рождения кумулятивных частиц в 4π -геометрии. *Труды третьего международного симпозиума – Пион-нуклонные и нуклон-нуклонные взаимодействия*, volume 2, стр. 357, Гатчина, (1989).

- [X] S.V.Afanasiev et al. The Data Acquisition and Trigger Systems for the Forward Detector of the SPHERE Spectrometer. In *Proceedings of the Intern. Symposium – Electronic Instrumentation in Physics*, page 85, Dubna, (1991).
- [XI] S.V.Afanasiev et al. The Data Acquisition of the SPHERE 4π -detector. In *Proc. of Conference on Computing in High Energy Physics*, page 791, Annecy, France, (1992).
- [XII] A.G.Litvinenko, S.V.Afanasiev, and P.I.Zarubin. Generalized scale variable for description of cumulative particle production in nucleus–nucleus collisions. In *Proceedings of the XIth International Seminar on High Energy Physics Problems*, ISHEPP'92, page 228, Dubna, Russia, (1992). JINR, Dubna, 1994.
- [XIII] V.K.Bondarev, A.G.Litvinenko, and P.I.Zarubin. Effects of nuclear density and charge distributions in a cumulative particle production. In *Proceedings of the XIth International Seminar on High Energy Physics Problems*, ISHEPP'92, page 235, Dubna, Russia, (1992). JINR, Dubna, 1994.
- [XIV] S.V.Afanasiev, ..., A.G.Litvinenko, et al. Measurement of the Tensor Analyzing Power for the Reaction of Fragmentation of Tensor Polarized Deuterons into Cumulative Pions. In *Proc. of the VI Workshop on High Energy Spin Physics*, page 55, Protvino, (1996).
- [XV] L.Zolin, ..., A.G.Litvinenk, et al. Study of Analyzing Power at Fragmentation of Tensor Polarized Deuterons into Cumulative Pions. In *Proceedings of the XIVth International Seminar on High Energy Physics Problems*, volume II of ISHEPP'98, page 38, Dubna, Russia, (1998). JINR, Dubna, 2000.
- [XVI] A.Yu.Illarionov, A.G.Litvinenko, and G.I.Lykasov. Polarization Phenomena in Fragmentation of Deuterons to Pions and Non-nucleon Degrees of Freedom in the Deuteron. In *Proceedings of the International IX Workshop on High Energy Spin Physics*, SPIN'2001, page 102, Dubna, Russia, (2001). JINR, Dubna, 2001.

- [XVII] S.V.Afanasiev et al. Spin Effects at Fragmentation of Polarized Deuterons into Cumulative Pions. In *Proceedings of International Nuclear Physics Conference*, INPC'2001, page 395. Melville, New York, 2002, (2001).
- [XVIII] L.Zolin and et al. In *Proceedings of 16thrd International spin physics symposium SPIN2004*, (ed. K.Aulenbasher and F.Bradomante and A.Bressan and A.Martin), page 565. World Scientific Publishing Co. PTe. Ltd, (2004).
- [XIX] S.Afanasev, ..., A.Litvinenko, T.Iwata, et al. Measurement of T_{20} for the cumulative pion production from tensor polarized deuterons in the momentum region 6.2–9.0 GeV/c. In *Proc. of the 12th Int. Symposium on High Energy Spin Physics*, SPIN'96, page 371, Amsterdam, The Netherlands, (1996). World Scientific, Singapore, 1997.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [A1] L.Zolin, A.Litvinenko, and P.Rukoyatkin. The Study of the Tensor Analyzing Power in Cumulative Particle Production on a Polarized Deuteron Beam at the Dubna Synchrophasotron. *JINR Rapid Communications (Pepan Letters)*, **1[69]–95**, 53, (1995).
- [A2] Ю.С.Анисимов, ..., А.Г.Литвиненко и др. Изучение зависимости сечений фрагментации релятивистских дейтронов в кумулятивные π^- -мезоны от атомного веса ядра мишени. *Ядерная Физика*, **60(6)**, 1070, (1997).
- [A3] В.К.Бондарев, А.Г.Литвиненко, А.И.Малахов и С.Г.Резников. *Ядерная Физика*, **64(9)**, 1698, (2001).
- [A4] А.Ю.Илларионов, А.Г.Литвиненко и Г.И.Лыкасов. Теоретический анализ тензорных анализирующих способностей в реакции фрагментации дейтронов в пионы. *Ядерная Физика*, **66(2)**, 1, (2003).
- [A5] А.Г.Литвиненко и В.С.Ставинский. Краткие сообщения ОИЯИ (Письма в ЭЧАЯ), **12**, 22, (1985).

- [A6] Ю.С.Анисимов и др. Сцинтилляционный передний спектрометр установки СФЕРА. Краткие сообщения ОИЯИ (Письма в ЭЧАЯ), **5**[51]–91, 23, (1991).
- [A7] Ю.С.Анисимов, ..., А.Г.Литвиненко и др. Измерение тензорной анализирующей способности реакции фрагментации тензорно-поляризованных дейтронов с импульсом от 6,2 до 9,0 ГэВ/с в кумулятивные пионы. Краткие сообщения ОИЯИ (Письма в ЭЧАЯ), **5**[73]–95, 31–40, (1995).
- [A8] A.Yu.Illarionov, A.G.Litvinenko, and G.I.Lykasov. Eur.Phys.J., **A 18**, 313, (2003).
- [A9] A.G.Litvinenko. The study of deuteron structure at short internucleon distances in reaction with hadronic probes. Czech.J.Phys., **51,Suppl.A.**, 299, (2001).
- [A10] A.Yu.Illarionov, A.G.Litvinenko, and G.I.Lykasov. Angle dependence of polarization observable by fragmentation of deuterons to pions. Czech.J.Phys., **51,Suppl.A.**, 307, (2001).
- [A11] S.Afanasiev et al. Tensor Analyzing Power T_{20} for Cumulative Pion Production from Deuterons in the GeV Energy Region. Nuclear Physics A, **A(625)**, 817, (1997).
- [A12] S.V.Afanasiev, ..., A.G.Litvinenko, et al. Fragmentation of Tensor Polarized deuterons into cumulative pions. Phys.Lett.B, **B(445)**, 14, (1998).
- [A13] L.S.Zolin et al. Search for D-state Effects in Cumulative Pion Production off Polarized Deuterons. Nucl.Phys.A, **A(689)**, 414c, (2001).
- [A14] A.Yu.Illarionov, A.G.Litvinenko, and G.I.Lykasov. Polarization Phenomena in Fragmentation of Deuterons to Pions and Non-nucleon Degrees of Freedom in the Deuteron. Eur. Phys. J., **A(14)**, 247, (2002).

- [A15] L.Zolin et al. Fragmentation of Polarized Deuteron into High Momentum Mesons as Source of Spin Information of Deuteron Core Structure. Nuclear Physics A, **A(721)**, 645c, (2003).
- [A16] L.S.Zolin et al. Fragmentation of 5 and 9 GeV polarized deuterons into high momentum pions. Few-Body, (17), S240, (2004).

Литература

- [1] А.М.Балдин и др. Сообщение ОИЯИ P1-11302, Дубна, (1978).
- [2] Ю.Д.Баюков и др. Препринт ИТЭФ, **4**, (1982).
- [3] А.М.Балдин и др. Сообщение ОИЯИ P1-83-432, Дубна, (1983).
- [4] В.Б.Гаврилов и др. ЯФ, **41**, 843, (1985).
- [5] А.В.Ефремов. Физика элементарных частиц и атомного ядра, **13(3)**, 613, (1982)
- [6] А.А.Белушкينا et al. In *Proc. of the 7-th Int. Symp. on High Energy Spin Physics*, volume 2, page 215, Protvino, USSR, (1986). IHEP, Serpukhov, 1987.
- [7] V.G.Ableev et al. Nucl.Instr.and Meth.in Phys.Res., **A(306)**, 73, (1991).
- [8] Л.С.Ажгирей и др. Ядерная Физика, **62(10)**, 1796–1811, (1999).
- [9] М.В.Токарев. In *Proceedings of the International Workshop DEUTERON'91*, volume E2–92–25 of *DEUTERON'91*, page 84, Dubna, Russia, (1991). JINR, Dubna, 1992.
- [10] А.М.Балдин. Nuclear Physics A, **A(434)**, 695, (1985).
- [11] M.Lancombe et al. Phys.Lett.B, **B(101)**, 139, (1981).
- [12] R.Machleidt, K.Holinde, and Elster. Phys.Rep., **149**, 1, (1987).
- [13] R.V.Reid. Ann.Phys. (N.Y.), **50**, 411, (1968).

- [14] A.Yu.Umnikov. *Z.Phys.*, **A357**, 333, (1997).
- [15] F.Gross, J.W.VanOrden, and K.Holinde. *Phys.Rev.*, **C45**, R1909, (1990).
- [16] L.L.Frankfurt and M.I.Strikman. *Phys. Rep.*, **76**, 215, (1981).
- [17] S.J.Brodsky et al. *Phys.Rev.*, **D8**, 4574, (1973).
- [18] В.С.Барашенков и Н.В.Славин. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **15(5)**, 997, (1984).
- [19] Г.И.Лыкасов. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **24(1)**, 140, (1993).
- [20] L.A.Glozman, V.G.Neudatchin, and I.T.Obukhovsky. *Phys. Rev.*, **C48**, 389, (1993).
- [21] А.Р.Кобушкин. *J.Phys. G:Nucl.Phys.*, **19**, 1993, (1993).
- [22] А.В.Ефремов и др. *Ядерная Физика*, **47**, 1364, (1988).
- [23] В.А.Карманов. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **19(3)**, 525, (1988).
- [24] L.S.Azhgirei and N.P.Yudin. *Ядерная Физика*, **68(1)**, 160, (2005).
- [25] W.Haeblerli. *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **17**, 373, (1967).
- [26] Л.И.Липидус. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **15(3)**, 493, (1984).
- [27] Н.Н.Barshall and W.Haeblerli. In *Proc. 3rd Int. Symp. Polarization Phenomena Nucl. Reactions*, page XXV, Madison, USA, (1970). Univ. of Wisconsin Press, Madison, 1971