

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-2002-34

На правах рукописи
УДК 539.12.01; 539.171.016; 539.172.17

ИЛЛАРИОНОВ
Алексей Юрьевич

**СТРУКТУРА ДЕЙТРОНА
НА МАЛЫХ МЕЖНУКЛОННЫХ РАССТОЯНИЯХ
И ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С АДРОНАМИ**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2002

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Г. И. ЛЫКАСОВ (ЛЯП ОИЯИ)

Официальные оппоненты:

кандидат физико-математических наук

О. В. ТЕРЯЕВ (ЛТФ ОИЯИ)

доктор физико-математических наук

С.В. АКУЛИНИЧЕВ (ИЯИ РАН, г. Москва)

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета, г. Москва.

Защита диссертации состоится “ ___ ” _____ 2002 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.И. ФЕДОТОВ

Актуальность темы. Структура атомных ядер на малых ($r < 1$ фм) межнуклонных расстояниях, соответствующих большим внутренним импульсам (k (ГэВ/с) $\approx 0.2/r$ (фм)), привлекает к себе внимание теоретиков и экспериментаторов уже более двадцати лет. Теоретическое описание состояний нуклонов на расстояниях, сравнимых с их “размерами”, затруднено из-за отсутствия к настоящему времени единой теории сильных взаимодействий. В рамках КХД, претендующей на роль теории сильных взаимодействий, проблема адронизации кварков к настоящему времени не решена. Пертурбативная КХД описывает лишь Q^2 -эволюцию распределений кварков в адронах и функции их фрагментации, оставляя в стороне вопрос о форме распределений при малых Q^2 , где уравнения эволюции неприменимы. Существующие непертурбативные модели КХД позволяют исследовать распределения кварков в адронах при малых и средних Q^2 . Но на малых расстояниях теоретическое изучение ядерной структуры связано с рядом трудностей. В частности, из-за неточности нуклонов не ясно не только, как описывать взаимодействие между нуклонами, но и насколько адекватно использование нуклонов в качестве квазичастиц. Естественно ожидать проявлений эффектов нуклон-нуклонных корреляций и ненуклонных степеней свободы аналогично тому, как перестраиваются внешние оболочки атома при образовании молекул или твердого тела. При этом дейтрон (связанное состояние протона и нейтрона), как простейшее ядро, несущее спин \mathcal{J} , четность P : $\mathcal{J}^P = 1^+$, и изоспин $I = 0$, представляет осо-

бый интерес. В последние годы продолжает активно разворачиваться программа исследования поляризационных характеристик дейтрона в адронных (COSY (Германия), RIKEN (Япония), ЛВЭ ОИЯИ (Дубна)) и электромагнитных (TJNAF (США)) процессах. Помимо проверки фундаментальных результатов КХД (например, изучения Q^2 -эволюции правила сумм Герасимова–Дрелла–Херна) целью предлагаемых экспериментов является реконструкция амплитуд соответствующих процессов из экспериментальных данных и полное исследование нуклонных импульсных распределений. Последние поляризационные эксперименты TJNAF лаборатории по измерению электромагнитных формфакторов дейтрона привело к заключению, что релятивистские модели, основанные на мезон-обменных силах, работают удивительно хорошо вплоть до больших Q^2 . Такое согласие с экспериментом полностью отсутствует в адрон-дейтронных реакциях. С другой стороны, было обнаружено, что импульсное распределение нуклонов в дейтроне, выделяемое из протон-дейтронных реакций и электрон-дейтронного неупругого рассеяния, совпадают друг с другом. Поэтому можно предположить, что как адронные, так и лептонные пробники дают одинаковую информацию о структуре дейтрона. Следовательно, возникает насущный вопрос исследования механизмов адрон-дейтронных процессов для согласования экспериментальной ситуации с лептон-дейтронными данными. Примером реакций, для которых имеется богатый экспериментальный материал, являются реакции фрагментации дейтрона в адроны в кинематической области, запрещенной для свободного нуклон-нуклонного рассеяния, так называемые кумулятивные процессы. Кажется естествен-

ной идея теоретического исследования поляризационных характеристик реакций кумулятивного рождения адронов с разным кварковым составом, что дает необходимую возможность для изучения механизмов реакций, различных аспектов спин-орбитальных взаимодействий в дейтроне и роли нуклонных и кварковых степеней свободы. Однако, прежде чем переходить к рассмотрению вкладов нуклонных степеней свободы и более сложных механизмов реакции, необходимо учесть предсказания нуклонной модели в ведущем порядке и для разных схем учета релятивистских эффектов в связанной системе.

Другим важным источником информации о характере нуклон-нуклонных корреляций в ядрах является исследование дейтроноподобных короткоживущих np -конфигураций, введение которых позволяет понять механизм ядерного фотопоглощения при энергиях выше гигантского дипольного резонанса и ниже порога пионного рождения. В настоящее время активно проводятся исследования нуклон-нуклонных корреляций в ядерной материи и конечных ядрах в рамках микроскопических теорий многих тел. Т.о. представляется важным изучение свойств дейтроноподобных конфигураций как в бесконечной коррелированной ядерной материи, так и для некоторых ядер, свойства основного состояния которых описаны с высокой точностью, используя спин-изоспин зависимые корреляционные функции и современные высокоточные микроскопические потенциалы.

Целью работы является, во-первых, исследование структуры дейтрона на малых межнуклонных расстояниях на основе всестороннего анализа реакций пионорождения $NN \rightarrow D\pi$, упругого протон-

дейтронного рассеяния назад и процесса фрагментации дейтронов в кумулятивные пионы, включая в рассмотрение релятивистские ядерные эффекты, нуклонные и нуклонные степени свободы, во-вторых, указать постановку новых экспериментов для извлечения принципиально новой информации о механизме реакций и об экзотических, нуклонных состояниях в ядрах, и, в-третьих, исследовать свойства возможных дейтроно-подобных конфигураций в бесконечной коррелированной ядерной материи и симметричных ядрах.

Научная новизна и практическая ценность.

Проведено всестороннее изучение возможных вкладов \mathcal{P} -волн дейтрона в поляризационные наблюдаемые процессов пионорождения $NN \rightarrow D\pi$ и упругого протон-дейтронного рассеяния назад. Продемонстрировано изменение знака некоторых поляризационных характеристик реакции $NN \rightarrow D\pi$ после учета этих эффектов, которое наблюдалось на эксперименте. Детально исследовано импульсное приближение реакции упругого протон-дейтронного рассеяния назад. Предложен ряд возможных уникальных экспериментальных тестов механизма реакции $pD \rightarrow Dp$ и величины \mathcal{P} -волны дейтрона.

Впервые ясно продемонстрирована роль нуклонной структуры дейтрона на малых $N-N$ расстояниях при исследовании поляризационных явлений в процессе фрагментации дейтрона в пионы, что является чрезвычайно актуальным в связи с проводимыми и планируемыми экспериментами.

Проведен теоретический анализ возможных квазидейтронных конфигураций в бесконечной коррелированной ядерной материи, в тяжелых ядрах, и в дважды магических ядрах ^{16}O и ^{40}Ca . Впервые

было вычислено число Левинжера, которое связывает сечение фотопоглощения на ядрах с сечением фотопоглощения на дейтроне, в рамках модели коррелированных базисных функций, учитывающей нуклон-нуклонные корреляции.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики и Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, а также представлялись и докладывались на международных симпозиумах “Дейтрон-95”, “Дейтрон-97”, “Дейтрон-99”, “Дейтрон-01” (Дубна, 1995, 1997, 1999, 2001), на международных рабочих совещаниях “Симметрия и Спин” – Прага Спин-96, Прага Спин-97, Прага Спин-00 (Прага, Чехия, 1996, 1997, 2000), на международном рабочем совещании “Современные проблемы малочастичных систем” (Дубна, 1997), на XIV и XV международных семинарах по проблемам физики высоких энергий “Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика” (Дубна, 1998, 2000), на международной школе “Рождение частиц при энергиях от МэВ до ТэВ” (Наймеген, Нидерланды, 1999), на 9-ой международной Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц (МГУ, Москва, 1999), на международных семинарах “Кварки/2000” (С.Петербург, 2000), “Физика высоких энергий и квантовая теория поля” (Тверь, 2000), “Электромагнитно индуцированная двухадронная эмиссия” (Лунд, Швеция, 2001), на международном семинаре по спиновой физике высоких энергий “Спин-01” (Дубна, 2001), на международной конференции по перспективам адронной физики (Триесте, Италия, 2001).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения общим объемом 105 страниц, включая 2 таблицы, 30 рисунков и список цитированной литературы из 150 наименований.

Содержание работы

Во введении формулируются основные цели и задачи исследования, обосновывается их актуальность и важность, далее кратко освещается содержание диссертации по главам.

В первой главе проводится планомерный анализ поляризационных явлений в реакциях типа $NN \rightarrow D\pi$, при кинетической энергии налетающего протона $T_p = 578$ ГэВ, что соответствует внутридейтронным расстояниям порядка ~ 0.4 фм. В рамках релятивистского подхода вычисляется когерентная сумма диаграмм одноуклонного обмена и перерасеяния π -мезона. При этом анализируется чувствительность всех наблюдаемых к форме πNN -тока и к выбору вида релятивистской волновой функции дейтрона. Проведено сравнение результатов расчета полного набора наблюдаемых с экспериментальными данными по реакции $pp \rightarrow D\pi^+$. При этом демонстрируется высокая чувствительность поляризационных наблюдаемых к эффектам схода с массовой поверхности внутри дейтрона и его \mathcal{P} -волновой компоненте, а также возможность изменения знака некоторых поляризационных характеристик после учета этих эффектов (см. рисунки 1.1 и 1.2).

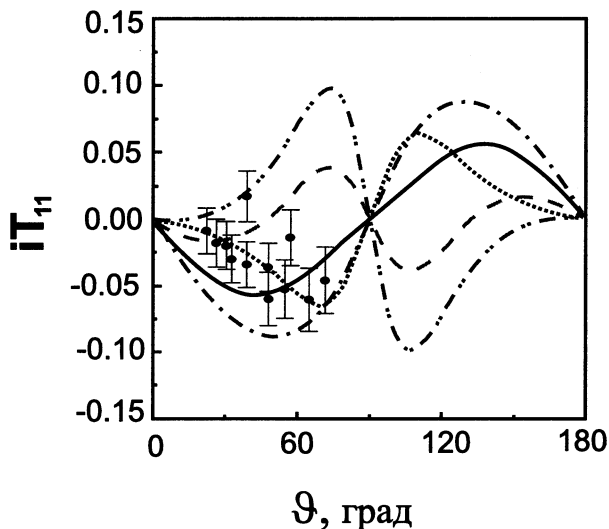


Рис. 1.1: Векторная поляризация iT_{11} процесса $pp \rightarrow D\pi^+$ при $T_p = 578$ МэВ. Штриховая, сплошная и штрихпунктирная кривые соответствуют ВФД в модели Бака-Гросса с разным процентным содержанием P -волны: $P_V = 0.74\%$, 1.04% и 1.46% соответственно. Результат расчета с нерелятивистской ВФД представлен штриховой кривой с двумя точками. Точечная кривая представляет парциально-волновой анализ.

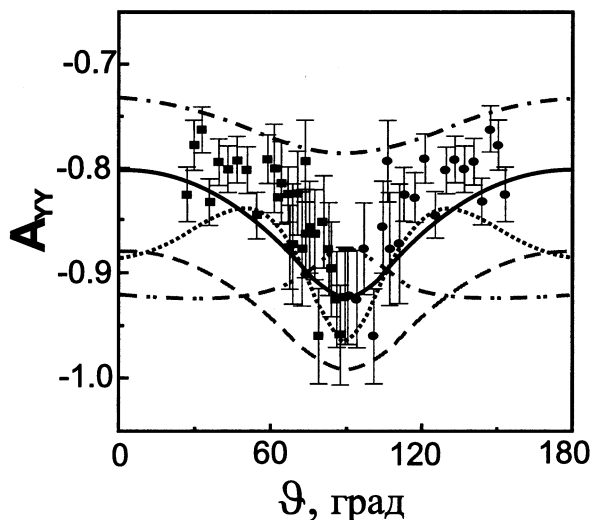


Рис. 1.2: Спиновая корреляция A_{yy} процесса $pp \rightarrow D\pi^+$ при $T_p = 578$ МэВ.. Обозначения такие же, как на рис. 1.1.

Во второй главе в рамках ковариантного подхода исследуется протон-дейтронное рассеяние назад. Найдено релятивистски-инвариантное разложение амплитуды реакции, что позволяет развить метод вычисления любых наблюдаемых для любого механизма реакции. Проводится всестороннее изучение возможных вкладов \mathcal{P} -волн дейтрона в поляризационные наблюдаемые упругого протон-дейтронного рассеяния назад, используя формализм спиральных амплитуд. Как первый шаг, подобное исследование проводится в рамках однонуклонного обмена, что позволяет отфакторизовать данный механизм и предложить ряд возможных уникальных экспериментальных тестов механизма реакции с помощью измерения определенных комбинаций поляризационных характеристик. Показана высокая чувствительность наблюдаемых к содержанию \mathcal{P} -волны дейтрона. В рамках импульсного приближения найдена прямая связь тензорной анализирующей способности T_{20} и передачи поляризации κ_0 с \mathcal{P} -компонентой волновой функцией дейтрона. Проведено сравнение теоретических расчетов и существующих экспериментальных данных.

В третьей главе проведен детальный анализ процесса фрагментации тензорно-поляризованных дейтронов в пионы в кинематической области, запрещенной для свободного нуклон-нуклонного столкновения. В рамках релятивистского импульсного приближения исследуются инклюзивный спектр пионов и тензорная анализирующая способность T_{20} при использовании различных видов волновой функции дейтрона. Также исследуется влияние \mathcal{P} -волновой компоненты дейтрона на эти наблюдаемые и демонстрируется слабая тенденция к

улучшению согласия с экспериментом. Показана более высокая чувствительность инвариантного спектра к форме элементарного акта $NN \rightarrow \pi X$ по сравнению с T_{20} . Учет ненуклонных степеней свободы в дейтроне в рамках модели, параметры которой подбирались из описания экспериментальных данных об инклюзивном спектре протонов в дейтронном стриппинге, позволяет описать имеющиеся экспериментальные данные об инклюзивном спектре пионов во всей кинематической области (рисунок 1.3), и значительно улучшает описание данных по T_{20} в области больших x (рисунок 1.4).

Четвертая глава посвящена исследованию дейтроно-подобных np -пар, несущих квантовые числа дейтрона, в бесконечной коррелированной ядерной материи, в тяжелых ядрах, и дважды магических ядрах ^{16}O и ^{40}Ca , используя теорию коррелированных базисных функций двух-нуклонной матрицы плотности. Впервые вычисляется полное число дейтроно-подобных пар на одну частицу, \mathcal{P}_D/A , что пропорционально вероятности образования пар в ядре (здесь A – атомный номер ядра). Полученный результат сравнивается с соответствующим феноменологическим результатом “квазидейтронной” модели Левинжера, предложенной для описания данных по ядерному фотопоглощению выше гигантского дипольного резонанса и ниже порога пионорождения. При этом найдено полное согласие с экспериментом (рисунок 1.5). Показывается, что теоретическое значение числа Левинжера $L(A)$ в диапазоне $150 \leq A \leq 250$ является почти постоянным. Поверхностное поведение $A^{-1/3}$ приводит к слабому росту $L(A)$ с увеличением числа нуклонов ядра A , и даже при $A \sim 200$ мы находимся довольно далеко от асимптотического режима.

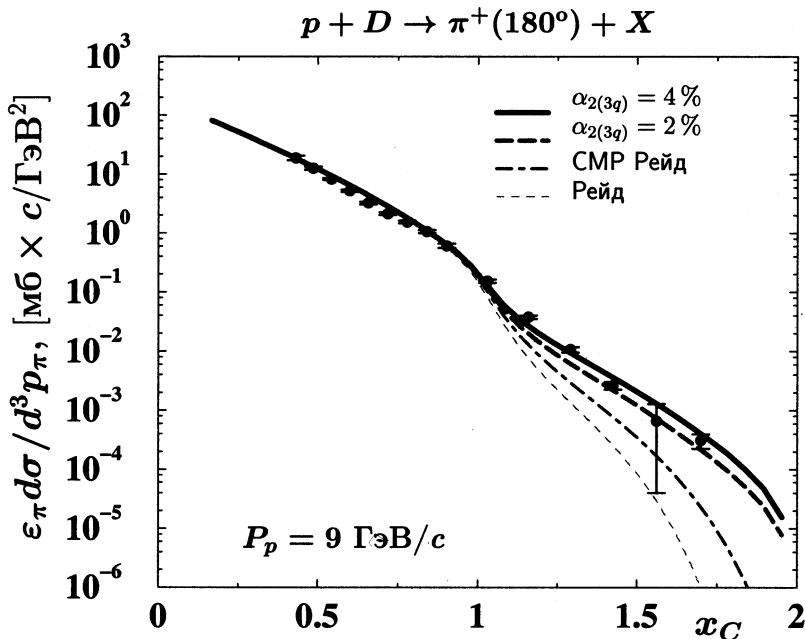


Рис. 1.3: Инклюзивный спектр пионов реакции $pD \rightarrow \pi^+X$ в зависимости от переменной Ставинского x_C , вычисленный в рамках релятивистского импульсного приближения с учетом нуклонной компоненты в дейтроне при разных значениях ее вероятности $\alpha_{2(3q)} = 2\% \div 4\%$ (штриховая и сплошная кривые соответственно). Тонкая штриховая кривая – расчет с нерелятивистской ВФД Рейда. Штрихпунктирная кривая – расчет с той же нерелятивистской ВФД в рамках схемы минимальной релятивизации.

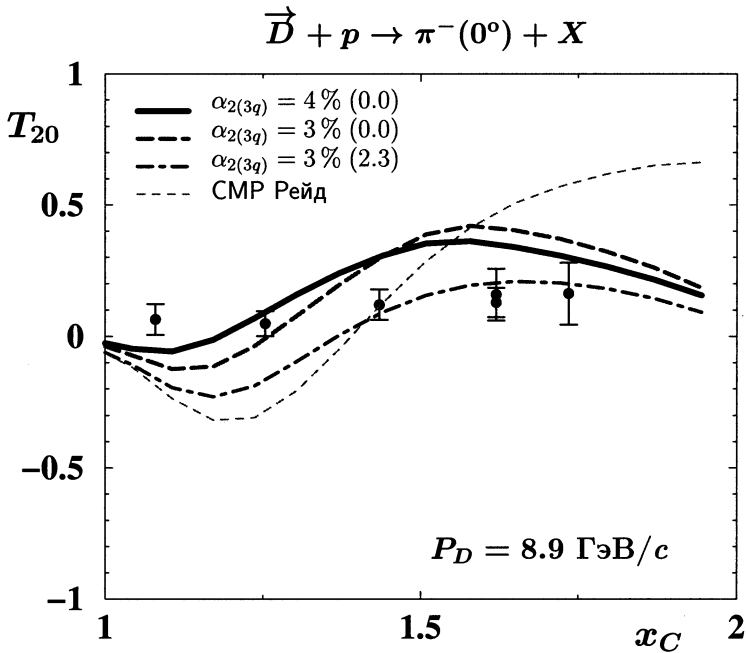


Рис. 1.4: Вклад ненуклонной компоненты ($\alpha_{2(3q)} = 3\% \div 4\%$) в T_{20} реакции $\vec{D}p \rightarrow \pi^-(0^\circ)X$ при разных значениях параметра смешивания $a = 0.0, 2.3$ (сплошная, штриховая и штрихпунктирная кривые соответственно) в предположении, что она изменяет только S - и D -волны двух нуклонов в дейтроне. Тонкая штриховая кривая – расчет с той же ВФД в рамках схемы минимальной релятивизации.

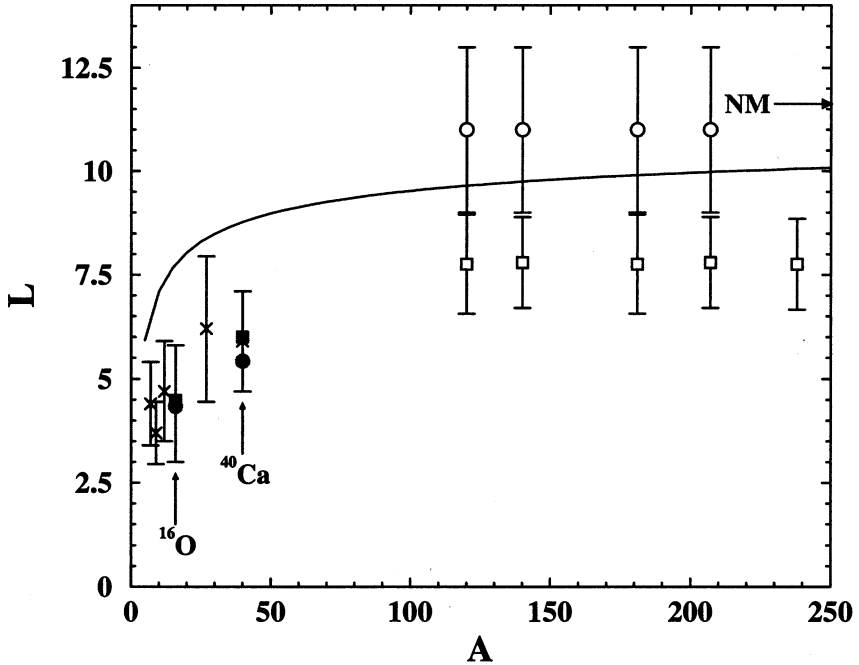


Рис. 1.5: Число Левинжера $L(A)$ для бесконечной симметричной ядерной среды (обозначен стрелкой), тяжелых ядер (сплошная кривая), дважды магических ядер ^{16}O и ^{40}Ca (закрашенные квадраты – оболочечная Ферми-модель, закрашенные кружки – коррелированная модель). Для тяжелых ядер ($A > 100$) использовалось приближение локальной плотности. Открытые значки соответствуют феноменологическим значениям $L(A)$, полученным при различных параметризациях доступных экспериментальных данных по фотореакциям.

В заключении приведены основные результаты диссертации и сформулированы главные выводы.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

1. При анализе реакций типа $NN \rightarrow D\pi$ показана высокая чувствительность поляризационных наблюдаемых к эффектам схода с массовой поверхности внутри дейтрона и его \mathcal{P} -волновой компоненте, а также к форме πNN -тока. Продемонстрировано изменение знака некоторых поляризационных характеристик после учета этих эффектов, наблюдаемое экспериментально.
2. В рамках импульсного приближения в процессе $pD \rightarrow Dp$ найдена прямая связь тензорной анализирующей способности T_{20} и передачи поляризации κ_0 с \mathcal{P} -компонентой волновой функцией дейтрона, вклад которой существенно влияет на поведение наблюдаемых. Предложен ряд возможных уникальных экспериментальных тестов по исследованию механизма реакции и определению величины \mathcal{P} -волны дейтрона.
3. Показана слабая чувствительность тензорной анализирующей способности T_{20} в процессе фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы к форме элементарного акта $NN \rightarrow \pi X$, что позволяет провести планомерное исследование структуры дейтрона в данной реакции. Учет ненуклонных степеней свободы в дейтроне в рамках модели, параметры которой подбирались для описания экспериментальных данных об инклюзивном спектре протонов в дейтронном стриппинге, позволило

описать имеющиеся экспериментальные данные об инклюзивном спектре пионов во всей кинематической области, и дало ключ к описанию новых данных по T_{20} в области больших x .

4. Впервые в рамках микроскопических теорий многих тел проведено исследование импульсного распределения дейтроно-подобных np -пар и вычислено соответствующее число Левинже-ра, связывающего сечение ядерного фотопоглощения с сечением фотопоглощения дейтрона, для бесконечной коррелированной ядерной материи, тяжелых ядер ($A > 100$), и дважды магических ядер ^{16}O и ^{40}Ca . При этом найдено полное согласие с экспериментальными данными по фотореакциям.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. A. Y. Illarionov and G. I. Lykasov, *Deuteron P-Wave in Elastic Backward Proton-Deuteron Scattering*, Phys. Rev. **C64**, #4, 044004 (Oct. 2001), [arXiv:nucl-th/0012062].
2. A. Y. Illarionov and G. I. Lykasov, *Polarization Phenomena in $NN \leftrightarrow D\pi$ Reactions*, Phys. Atom. Nucl. **64**, #8, 1392–1408 (Aug. 2001), [arXiv:nucl-th/9807075].
3. A. Y. Illarionov, A. G. Litvinenko, and G. I. Lykasov, *Angle Dependence of Polarization Observables by Fragmentation of Deuterons to Pions*, Czech. J. Phys., Suppl. A, **51** (2001) A703, [arXiv:nucl-th/0012290].
- 4,5. A. Y. Illarionov, A. G. Litvinenko, and G. I. Lykasov, *Theoretical Analysis of the Tensor Analyzing Powers by Deuteron*

- Fragmentation into Pions. (In Russian)*, Accepted for publication by Phys. Atom. Nucl. **65**, (2002), [JINR-P2-2001-104].
6. **A. Y. Illarionov, A. G. Litvinenko, and G. I. Lykasov**, *Polarization Phenomena by Deuteron Fragmentation into Pions*, Accepted for publication by J. Phys. G (2002), [arXiv:hep-ph/0007358].
 7. **O. Benhar, A. Fabrocini, S. Fantoni, A. Y. Illarionov, and G. I. Lykasov**, *Deuteron Distribution in Nuclear Matter*, Accepted for publication by Nucl. Phys. A (2002), [arXiv:nucl-th/0106042].
 8. **A. Y. Illarionov and G. I. Lykasov**, *Relativistic and polarization phenomena in $NN \rightarrow D\pi$ processes*, Preprint JINR, E2-98-296, Dubna, 1998; [arXiv:nucl-th/9807075].
 9. **A. Y. Illarionov and G. I. Lykasov**, *Relativistic calculation of polarization observables in $NN \rightarrow D\pi$ processes*, in Proc. of the XIV International Seminar on High Energy Physics Problems “*Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics*”, JINR, Dubna, **Russia**, 17-22 August, 1998.
 10. **A. Y. Illarionov, A. G. Litvinenko, and G. I. Lykasov**, *Deuteron fragmentation into pions and polarization phenomena*, in the Proc. of the V International Symposium “*DEUTERON-99*”, Dubna, **Russia**, July 6-10, 1999.
 11. **A. Y. Illarionov, A. G. Litvinenko, and G. I. Lykasov**, *The Study of Reaction of Deuteron Fragmentation into Cumulative*

Pions, in the Proc. of the International Workshop “*Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds MeV to TeV.*”, Stara Lesna, **Slovak Republic**, June 26 - July 1, 2000.

12. **A. Y. Illarionov and G. I. Lykasov**, *Possibly to test the mechanism of elastic backward proton-deuteron scattering?*, ICTP Preprint No.IC2000185, Miramare-Trieste, **Italy**, 2000, [arXiv:nucl-th/0012018].
13. **O. Benhar, A. Fabrocini, S. Fantoni, A. Y. Illarionov, and G. I. Lykasov**, *Deuteron-like states in nuclear matter and in finite nucleus*, in Proc. of the V Open Conference of Young Scientists (in Russian), Dubna, **Russia**, February 5-10, 2001.
14. **A. Y. Illarionov and G. I. Lykasov**, *Deuteron Structure at Small $N - N$ Distances from Inelastic $e - D$ and $p - D$ Reactions*, in Proc. of the 5th Workshop on “*Electromagnetically Induced Two-Hadron Emission*”, Lund, **Sweden**, June 13-16, 2001.

Получено 1 марта 2002 г.

Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 04.03.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,66. Тираж 100 экз. Заказ № 53158.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.