

Б-894

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-92-444

**БРАТКОВСКАЯ
Елена Леонтьевна**

**УДК 539.17.01+
539.12.01**

**РЕАКЦИИ ЭЛЕКТРОРАСЩЕПЛЕНИЯ
ПОЛЯРИЗОВАННОГО ДЕЙТРОНА И
ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕПТОННЫХ ПАР В
ПРОТОН-ДЕЙТРОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1992

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

доктор физико-математических наук А.И. Титов
доктор физико-математических наук Б.Л. Резник

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук С.Б. Герасимов
доктор физико-математических наук А.П. Кобушкин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Санкт-Петербургский государственный университет

Защита диссертации состоится "23" декабря 1992 г. на заседании Специализированного совета К 047.01.01 Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "13" ноября 1992 г.

Ученый секретарь Совета,
кандидат физико-математических наук А.Е. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современной ядерной физике большое внимание уделяется поиску и исследованию ненуклонных степеней свободы в ядрах и ядерных процессах. В основных состояниях ядер ненуклонными компонентами являются мезонные, изобарные, многокварковые и т.п. конфигурации. В высоковозбужденных ядерных системах под ненуклонными состояниями обычно подразумеваются состояния кварк-глюонной плазмы.

В последнее время обсуждается еще одно свойство высоковозбужденной адронной материи — так называемый киральный фазовый переход. В этом случае при конечных температурах и барионных плотностях ожидается восстановление киральной симметрии, которая при нулевых температурах спонтанно нарушена.

Основным источником информации о ненуклонных компонентах являются ядерные процессы с большой передачей импульса. Это реакции упругого и глубоконеупругого рассеяния электронов легчайшими ядрами, экспериментальные исследования которых ведутся в ускорительных центрах ХФТИ, SLAC, SACLÉ и планируются на установке CEBAF. Кроме того, информация о ненуклонных компонентах в ядрах в течении ряда лет извлекается из данных по кумулятивным адрон-ядерным реакциям, полученных в ОИЯИ и ИТЭФ.

Фазовые переходы в высоковозбужденных ядерных состояниях планируется изучать в центральных столкновениях тяжелых релятивистских ядер путем исследования спектров вторичных частиц, излучаемых из высоковозбужденной ядерной зоны. Наиболее перспекти-

вным здесь представляется исследование спектров реальных или виртуальных фотонов (лептонных пар). При этом спектр дилептонов более информативен, поскольку они имеют дополнительную степень свободы — инвариантную массу виртуального фотона (лептонной пары). Имеющиеся экспериментальные данные по e^+e^- -рождению в адрон- и ядро-ядерных взаимодействиях при промежуточных энергиях получены DLS-коллекцией в Беркли. Первые данные по образованию димюонов были получены на установке СФЕРА в ОИЯИ. Эти исследования будут продолжены и расширены при вводе в эксплуатацию в ОИЯИ нового сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер — нуклотрона.

В обоих случаях проявление экзотических состояний ядерного вещества происходит на фоне обычных нуклон-нуклонных взаимодействий. Проблема корректного учета ядерных и фоновых эффектов всегда актуальна, когда из какого-либо процесса нужно извлечь информацию о всевозможной “экзотике”. Упрощенные оценки ядерных эффектов могут привести к неправильным выводам о величине примесей ненуклонных компонент и существовании фазового перехода.

Цель работы состоит в исследовании влияния ядерного взаимодействия в конечном состоянии и эффекта антисимметризации по кварковым переменным в электрорасщеплении дейтрона; исследовании различных механизмов образования лептонных пар в протон-дейтронных столкновениях, расчете и анализе сечения образования векторных мезонов вблизи порога.

Научная новизна и ценность работы.

Впервые наиболее полно исследованы эффекты взаимодействия в конечном состоянии (ВКС) в реакции электрорасщепления поляризованных дейтронов на основе точного решения уравнения Шредингера для непрерывного спектра с реалистическим (“парижским”) потенциалом, учитывающим обмен $\sigma, \pi, \rho, \omega$ -мезонами. Предсказано влияние эффектов ВКС на эксклюзивные и инклюзивные сечения и на величину T_{20} (чувствительность к квадрупольной поляризации дейтрона). Новым моментом является учет эффекта антисимметризации по кварковым переменным как одного из проявлений многокварковой структуры нуклонов в наблюдаемых характеристиках реакции. Показано, что в достигнутых на сегодняшний день кинематических областях вклад антисимметризации в инклюзивных спектрах не превышает 10%, но он увеличивается с ростом переданного импульса, что нужно учитывать при анализе будущих экспериментов.

На основе киральной модели Намбу-Иона-Ласинио, содержащей мезонный и дикуарковый секторы, впервые рассчитаны спектры рождения векторных мезонов в реакции протон-протонного рассеяния вблизи порога. Построена диаграммная техника для расчета амплитуд конкретных процессов. Исследована температурная зависимость сечения образования ρ/ω в горячей ядерной зоне и предсказано, что полное сечение имеет максимум в точке кирального фазового перехода, который может быть наблюдаем экспериментально.

Проанализированы относительные вклады в дилептонные спектры различных источников образования

лептонных пар в pp - и pd -взаимодействиях при промежуточных энергиях: тормозного излучения в pn -взаимодействии, далицевских распадов Δ -изобары и η - и ω -мезонов, прямой конверсии векторных ρ, ω -мезонов. Впервые предложены механизмы 1) динамического подавления вклада тормозного излучения за счет учета немассовости виртуального протона и 2) динамического подавления вклада далицевских распадов Δ -изобары за счет учета зависимости вероятности образования Δ -изобары от ее массы. Показано, что по мере увеличения начальной энергии вклад тормозного излучения уменьшается и доминируют адронные источники дилептонов.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, неоднократно обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, кафедры теоретической и ядерной физики ДВГУ, докладывались на рабочем семинаре ДВГУ-МГУ (Владивосток—1989 г.), Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна—1990 г.), Международном рабочем совещании по структуре дейтрона (Дубна—1991 г.), на Международной школе-семинаре по релятивистской ядерной динамике (Владивосток—1991 г.), на XIX Международном рабочем совещании по свойствам ядер и ядерным возбуждениям (Хиршег, Австрия—1991 г.), на Международных рабочих совещаниях по программе Гейзенберг-Ландау (Дубна—1991, 1992 гг.).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в двенадцати печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка лите-

ратуры. Объем диссертации — 110 страниц машинописного текста, 44 рисунка, 3 таблицы. Библиография содержит 127 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава посвящена рассмотрению электрорасщепления поляризованных дейтронов.

Поляризационные характеристики определяются комбинацией сечений с различными проекциями спина дейтрона и в силу этого оказываются чувствительными к компонентам дейтронной волновой функции. Это подтверждается имеющимися экспериментальными данными и теоретическим анализом фрагментации поляризованных дейтронов на ядрах. Здесь интересно то, что импульсное приближение с реалистическими волновыми функциями не дает даже качественного описания квадруполяризации дейтрона T_{20} . Показано, что только в рамках простейших представлений о механизме реакций (в данном случае — в пренебрежении ВКС) теоретические выражения для T_{20} в эксклюзивном и инклюзивном случаях совпадают между собой, а также с полученными для других реакций. Учет же ВКС может кардинально изменить результаты. Проведенные расчеты убедительно показывают, что без учета ВКС некорректно анализировать будущие поляризационные эксперименты (программа ускорителя CEBAF, США, 1995 г.). С другой стороны, показано, что и здесь можно найти такие ки-

нематические области, где вклады ВКС будут незначительны, что позволит непосредственно изучать особенности структуры дейтрона, связанные с ненуклонными степенями свободы.

Исследовано проявление кварковой структуры самих нуклонов — эффекты антисимметризации по кварковым переменным. Показано, что на тех межнуклонных расстояниях, которые достижимы сейчас в экспериментах с электронами, учет антисимметризации слабо (на уровне 3-5%) изменяет результаты обычных ядерных моделей дейтрона. Следует отметить, что полученные формулы, учитывающие принцип Паули, могут быть использованы в дальнейшем при анализе экспериментов с большими передачами импульса, где можно ожидать заметного влияния эффектов антисимметризации.

Во второй главе на основе кирально инвариантного лагранжиана типа Намбу–Иона-Ласинио исследована проблема образования векторных мезонов при низких энергиях.

Модельный лагранжиан содержит мезонный и дикварковый секторы с различными константами взаимодействия. Построена диаграммная техника для расчета амплитуд. Показано, что для описания экспериментальных данных недостаточно учитывать только мезонный сектор. Вклад дикварков существен, и поэтому полное сечение чувствительно к выбору параметров в дикварковом секторе. Проанализирован выход ρ - и ω -мезонов в зоне горячей и плотной ядерной материи. Обнаружено, что зависимость сечения векторных мезонов от температуры имеет немонотонный характер, что обусловлено

различной температурной зависимостью вкладов от разных источников образования векторных мезонов. Это исследование послужило основой для расчетов выхода дилептонов из высоковозбужденной адронной среды, представленных в 4-й главе диссертации.

Третья глава посвящена исследованию вклада тормозного излучения в образование лептонных пар в pn - и pd -взаимодействиях при начальных энергиях 1 ÷ 5 ГэВ/нуклон.

Сечение тормозных дилептонов рассчитывается в приближении однобозонного обмена, где параметры двухчастичной T -матрицы выбираются из условия удовлетворительного описания экспериментальных данных по упругому pn -рассеянию при соответствующих энергиях. Показано, что теоретическое сечение с учетом электромагнитного формфактора в $pp\gamma$ -вершине, следующего из модели векторной доминантности, превышает экспериментально измеренное и слабо зависит от выбора параметров двухчастичной T -матрицы. Сделан вывод о необходимости динамического подавления вклада тормозного излучения, реализованный в предложенной модели учета немассовости двухчастичной T -матрицы. Рассчитанные спектры тормозных дилептонов показали, что подавление тормозного излучения из-за немассовости виртуального нуклона возрастает с ростом начальной энергии.

Четвертая глава посвящена анализу адронных источников лептонных пар в pn - и pd -взаимодействиях.

При расчете вклада далицевских распадов Δ -изобар возникает та же проблема, что и в случае тормозного из-

лучения — превышение теоретического сечения над экспериментальным при больших инвариантных массах дилептонов. Новым моментом является учет зависимости квадрата амплитуды рождения Δ -изобары от ее массы, который приводит к дополнительному подавлению выхода дилептонов. Рассчитываются вклады далицевских распадов η - и ω -мезонов и анализируется вклад от распадов векторных мезонов, образующихся в нуклон-нуклонных столкновениях.

Проведен сравнительный анализ выхода дилептонов в pp - и pd -взаимодействиях. Показано, что только после тщательного изучения механизма рождения дилептонов можно надеяться на реальность использования лептонных пар в качестве инструмента исследования ядерной среды в условиях высоких температур и плотностей.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

В приложении излагается метод искаженных волн в реакции электрорасщепления дейтрона, используемый при расчете сечений.

Основные результаты диссертации, выдвигаемые на защиту

1. Исследовано влияние взаимодействия в конечном состоянии на инклюзивные и эксклюзивные поляризационные характеристики реакции $e\vec{d} \rightarrow e'np$. Показано, что поляризационные характеристики очень чувствительны к предположениям о механизме реакции и что широко используемое плосковолновое приближение не позволяет, вообще говоря, получить адекватную информацию об

“экзотике” в поляризационных экспериментах. Вывод качественно согласуется с результатами анализа других реакций.

Определены кинематические области, в которых ВКС играет доминирующую роль при описании инклюзивных и эксклюзивных поляризационных экспериментов с электронами. Для исследования ненулевых степеней свободы ядер более естественны иные области.

2. Проведены расчеты характеристик процесса электрорасщепления с учетом кварковой структуры нуклонов. Показано, что эффект антисимметризации волновой функции дейтрона по кварковым переменным пренебрежимо мал в экспериментально исследованных кинематических областях, но его учет необходим при больших передачах импульса.

3. Рассчитано сечение образования векторных мезонов в pp -столкновениях в рамках модели Намбу-Иона-Ласиннио, содержащей кирально инвариантные четырехкварковые взаимодействия в мезонном и дикварковом секторах с различными значениями констант связи. Построена диаграммная техника для расчета амплитуд конкретных процессов. Показано, что главный вклад в сечение рождения ρ - и ω -мезонов происходит от диаграмм с промежуточным скалярным дикварком с массой $m_D \sim 2m$, где конституентная масса кварка m около $300 \text{ МэВ}/c^2$.

4. Проведен анализ сечения образования ρ, ω -мезонов в горячей ядерной зоне. Показано, что вблизи точки кирального фазового перехода вклад дикварков резко уменьшается, а вклад мезонного обмена увеличивается и

становится доминирующим. Поэтому полное сечение рождения ρ , ω -мезонов имеет максимум в точке фазового перехода. В принципе этот эффект может быть экспериментально наблюдаем.

5. В модели однобозонного обмена исследован вклад тормозного излучения в образование лептонных пар в pd -взаимодействии при начальных энергиях $1 \div 5$ ГэВ. Показано, что сечение тормозного излучения слабо чувствительно к выбору параметров двухчастичной T -матрицы, и, следовательно, изменением только модельных параметров трудно добиться заметного уменьшения сечения, которое необходимо для достижения согласия теоретических предсказаний с экспериментом.

6. Предложен механизм подавления вклада тормозного излучения за счет учета немассовости виртуального протона. Для этого в вершинные формфакторы двухчастичной T -матрицы и в электромагнитные $pp\gamma$ -формфакторы вводится дополнительная зависимость от $\xi = p_\mu p^\mu / m^2$ (p_μ — четырехимпульс, m — масса нуклона), которая находится на основе модели релятивистского гармонического осциллятора. В рамках данного подхода проведены численные расчеты сечения выхода лептонных пар в pd -взаимодействии и отношения сечений, рассчитанных с учетом ξ -зависимости в формфакторах и без нее. Показано, что с увеличением начальной энергии динамическое подавление тормозного излучения возрастает на порядок и более.

7. Проведено теоретическое исследование адронных источников лептонных пар в pd -взаимодействии при начальных энергиях $1 \div 5$ ГэВ: далицевских распадов Δ -

пзобары и η , ω -мезонов, прямой конверсии векторных ρ , ω -мезонов. Предложен механизм динамического подавления вклада Δ -пзобары за счет учета зависимости вероятности ее образования от массы Δ -пзобары. Проведены численные расчеты сечения $d\sigma/dM$ и установлено, что указанный вклад может быть подавлен на порядок. Рассчитаны вклады далицевских распадов η - и ω -мезонов и прямой конверсии векторных ρ , ω -мезонов, образующихся в нуклон-нуклонных столкновениях.

8. Проанализированы относительные вклады различных источников дилептонов в сечение $d\sigma/dM$ при взаимодействии протона с пзоскалярным нуклоном, а также в отношении выхода лептонных пар в pp - и pd -взаимодействиях для начальных энергий $E_{kin} = 1.0, 2.1, 4.9$ ГэВ. Показано, что при увеличении E_{kin} вклад тормозного излучения уменьшается, так что доминируют адронные источники дилептонов, причем наибольший вклад дают далицевские распады Δ -пзобар.

9. Сделан вывод, что сечение выхода дилептонов в pp - и pd -взаимодействиях чувствительно к используемым предположениям о механизме их образования. Поэтому желательны надежные экспериментальные данные как по выходу дилептонов при разных начальных энергиях, так и по околопороговым сечениям образования ρ , ω , η -мезонов — “адронных” источников. Только после тщательного изучения и определения механизма рождения дилептонов в NN -взаимодействиях можно надеяться на реальность их использования как инструмента исследования ядерной среды в условиях высоких температур и плотностей.

- [1] Братковская Е.Л., Гой А.А., Доркин С.М., Резник Б.Л., Умников А.Ю. *Инклюзивная реакция $ed \rightarrow e'np$ эффекты взаимодействия в конечном состоянии, угасейлинг и структура дейтрона.* — Известия АН СССР, Серия физическая, 1990, т. 54, вып. 5, сс. 959–966.
- [2] Bratkovskaya E.L., Goy A.A., Reznik B.L., Titov A.I. *On the Distribution of Polarized Deuteron in the Reaction $ed \rightarrow e'np$.* — Proceedings of the X International Seminar on the High Energy Physics Problems, Theses, Dubna, 1990, p. 54.
- [3] Bratkovskaya E.L., Goy A.A., Reznik B.L., Titov A.I. *On the Distribution of Polarized Deuteron in the Reaction $ed \rightarrow e'np$.* — Proceedings of the X International Seminar on the High Energy Physics Problems, Dubna, 1990, pp. 344–348.
- [4] Bratkovskaya E.L., Goy A.A., Reznik B.L., Titov A.I. *The Electrodisintegration of Polarized Deuteron and the Final State interaction.* — Communications of JINR, E2-90-524, Dubna, 1990, 9 p.
- [5] Братковская Е.Л., Гой А.А., Резник Б.Л., Титов А.И. *Электрорасщепление поляризованных дейтронов и взаимодействие в конечном состоянии.* — ЯФ, 1991, т. 53, вып. 4, сс. 934–941.

- [6] Братковская Е.Л., Резник Б.Л., Титов А.И. *О проявлении кварковой структуры нуклонов в реакции электрорасщепления дейтрона.* — Сообщения ОИЯИ, P2-90-394, Дубна, 1990, 9 с.
- [7] Bratkovskaya E.L., Titov A.I. *On the Vector Meson Production in Nambu–Jona-Lasinio Model.* — Preprint JINR, E2-91-442, 1991, 11 p.; — Phys. Lett., 1992, v. B282, № 1,2, pp. 127–131.
- [8] Bratkovskaya E.L., Titov A.I. *On the Vector Meson Production within Nambu–Jona-Lasinio Model.* — Preprint GSI-91-60, 1991, 13 p.
- [9] Bratkovskaya E.L., Titov A.I. *On the Vector Meson Production in Nambu–Jona-Lasinio Model.* — Proceeding of the International School Seminar on Relativistic Nuclear Dynamics, Vladivostok, Sept. 1991.
- [10] Bratkovskaya E.L., Titov A.I. *Dilepton Production at Intermediate Energies.* — Conts. of 19 Int. Workshop Gross Properties of Nuclei and Nucl. Excitations, Hirschegg, Jan. 1991.
- [11] Братковская Е.Л., Титов А.И. *Рождение векторных мезонов в модели Намбу–Иона-Ласинио.* — ЯФ, 1992, т. 55, вып. 10, сс. 2525–2533.
- [12] Братковская Е.Л., Резник Б.Л., Титов А.И. *О вкладе тормозного излучения в образование лептонных пар при промежуточных энергиях.* — Препринт ОИЯИ, P2-92-151, 1992, 14 с.; — ЯФ, 1992, т. 55, вып. 11, сс. 3058–3066.