

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-2001-95

На правах рукописи
УДК 539.12.01; 539.17.01; 539.172.12/13

С - 306

СЕМИХ
Сергей Сергеевич

**СПЕКТР МАСС УРАВНЕНИЯ БЕТЕ-СОЛПИТЕРА
И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ
В ПРОТОН-ДЕЙТРОННОМ РАССЕЯНИИ**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2001

Общая характеристика диссертации.

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

Научные руководители:

доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

Л.П. КАПТАРЬ
С.М. ДОРКИН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

В.А. КАРМАНОВ
Н.П. ЮДИН

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный университет, г. С.-Петербург.

Защита диссертации состоится “___” _____ 2001 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета К 720.001.01 в 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 “___” _____ 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

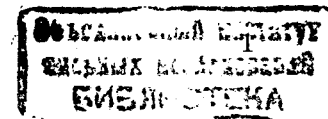


С.И. ФЕДОТОВ

Актуальность темы. Процессы поляризованного протон-дейтронного рассеяния являются весьма мощным инструментом в современных исследованиях адронных взаимодействий (в частности, нуклон-нуклонных сил), и обладают богатыми возможностями применения. Простейшие и наиболее исследуемые из этих реакций – это рассеяние протонов вперед или назад, подразделяющееся на инклюзивную и эксклюзивную фрагментацию и упругое рассеяние. Одна из главных причин неубывающего интереса к ним – это многочисленные экспериментальные и теоретические указания на возможность прямого изучения структуры дейтрона в таких процессах. Исследование поляризационных наблюдаемых способно прояснить различные аспекты спин-орбитальных взаимодействий в дейтроне, роль ненуклонных степеней свободы (Δ -изобар, мезонных токов и т.д.) и релятивистских эффектов в его волновой функции. Предлагаемые эксперименты достигают уже того уровня детальности, когда становится возможной численная реконструкция амплитуд соответствующих процессов из экспериментальных данных.

Актуальность исследований pD -рассеяния подтверждается текущими и планируемыми экспериментами в ведущих лабораториях мира (COSY, RIKEN, Дубна). Помимо уже упомянутых, она обусловлена и более практическими причинами, среди которых выделяется создание дейтронных тензорных поляриметров, охватывающих как можно более широкий интервал энергий, вплоть до релятивистских значений. Такие устройства могут быть сконструированы на основе процессов $pD \rightarrow n(pp)$ и $pD \rightarrow Dp$, и имеют важное значение для чрезвычайно широкого спектра задач, где необходимо измерение поляризации дейтрона в конечном состоянии реакции (например, измерение T_{20} в процессе $pp \rightarrow D\pi^+$, используемом при исследовании $NN\pi$ -систем, или в неупругих (\vec{D}, \vec{D}')-реакциях на тяжелых ядрах для изучения изоскалярных переходов $\Delta T = 0, \Delta S = 1$, и многое другое).

Прогресс экспериментальной базы поляризованных пучков частиц



уже шагнул в область релятивистских значений энергии, и при описании процессов с их участием неизбежно возникают принципиальные вопросы о применимости нерелятивистской картины. Изучение релятивистских эффектов в наблюдаемых величинах (их классификация и определение степени влияния на результаты) является неотъемлемым этапом исследования механизмов реакций, и требует последовательных методов. Это стимулирует развитие таких самосогласованных релятивистских подходов, как формализм Бете–Солпитера (БС), который включает в себя как методы описания связанных состояний (в данном случае дейтрона), так и реакций с их участием. Понятно, что для приложения к адронным процессам типа pD -рассеяния подход БС должен основываться на адекватной модели нуклон-нуклонного взаимодействия. Поэтому в его рамках мощный импульс к развитию получают эффективные мезон-нуклонные теории, которые дают простую ковариантную параметризацию ядерных сил, используя относительно малое число параметров (массы и константы связи мезонов, параметры обрезания). В методическом смысле это выводит их на качественно новый уровень последовательно релятивистского описания NN -взаимодействий. Таким образом, обращение к подходу БС оказывается весьма плодотворным, несмотря на его техническую сложность, а построение в его рамках ковариантных моделей реакций и разработка методов расчета наблюдаемых величин является актуальной задачей. Также следует отметить, что подход БС актуален не только в релятивистской ядерной физике, но и в области КХД при модельном описании спектра масс мезонов как связанных состояний $q\bar{q}$.

Цель работы состоит в разработке строгих методов и алгоритмов численного решения уравнений БС, которые позволили бы единым образом получить амплитуды БС не только для основного состояния системы, но и для всех возбужденных, проанализировав таким образом ее энергетический спектр. Важнейшими задачами диссертации также являются i) получение на основе разработанных методов конкретного решения уравнения БС для дейтрона, ii) всестороннее исследование роли релятивистских эффектов (поправок от лоренц-буста и

от P -волн) в поляризационных наблюдаемых величинах целого класса реакций протон-дейтронного рассеяния при промежуточных и высоких энергиях, iii) выполнение предсказательных расчетов для планируемых экспериментов.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации предлагается весьма общий метод исследования спектра масс спиновых уравнений БС в лестничном приближении, основанный на полученных в работе новых биортогональных разложениях достаточно широкого класса ядер таких уравнений. Эти методы актуальны, в частности, для расчетов спектров мезонов как связанных состояний кварк-антикварк на основе уравнений БС с ядрами взаимодействий, мотивированными КХД.

На основе техники Мандельштама и с использованием нестационарных спиновых структур амплитуд реакций предлагается метод расчета поляризационных наблюдаемых в процессах рассеяния поляризованных протонов на поляризованных дейтронах. Впервые в рамках ковариантного формализма анализируется полный набор поляризационных характеристик для восстановления амплитуды упругого pD -рассеяния на 180° и влияние на них диаграмм с мезонным обменом (треугольных диаграмм). Выделены и численно исследованы вклады релятивистских эффектов (поправок от лоренц-буста и вкладов P -волн) в наблюдаемые величины. Проведено детальное исследование процесса перезарядки $pD \rightarrow n(pp)$ при высоких энергиях и проанализирована возможность создания на его основе дейтронного тензорного поляриметра в кинематических условиях планируемых экспериментов.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, неоднократно докладывались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова (ОИЯИ), Института адронной и ядерной физики Исследовательского центра Россендорф (Германия), филиалов INFN в Перудже, Риме и Триесте (Италия), физического факультета С.-Петербургского государственного университета. Они были представлены и докладывались на Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий ISHEPP–XV (Дубна, 2000 г.); на

международных симпозиумах "Дейтрон-97" и "Дейтрон-99" (Дубна, 1997 и 1999 гг.); на международном рабочем совещании "Progress in Current Few-Body Problems" (Дубна, 1997 г.); на Первой и Пятой конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 1997 и 2001 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 147 страниц, включая 2 таблицы, 29 рисунков и список цитированной литературы из 102 наименований.

Содержание работы

Во введении обсуждается актуальность работы и мотивация проводимых исследований, формулируется предмет и цель диссертации, а также приводится ее краткое содержание.

Первая глава имеет преимущественно вводный характер и посвящена обзору общих положений подхода Бете-Солпитера. В ней формулируются основные понятия и объекты формализма БС – уравнения и амплитуды БС, ядра взаимодействия, и на примере процесса $pD \rightarrow Dp$ излагается метод вычисления наблюдаемых величин в подходе БС (метод Мандельштама). Глава содержит обзор общих трансформационных свойств амплитуд БС относительно преобразований Лоренца, пространственной инверсии, обращения времени и пр. Также на основе метода спин-угловых гармоник проводится парциальное разложение произвольной амплитуды БС.

Во второй главе развивается метод исследования энергетического спектра однородных уравнений БС в лестничном приближении – метод исчерпывания, который позволяет получать собственные значения энергии и соответствующие им решения уравнений (амплитуды). Суть предлагаемого метода излагается на примере скаляр-скалярного уравнения БС. Для этого ядро уравнения БС модифицируется таким образом, чтобы в результате получить эквивалентное симметричное урав-

нение Фредгольма, для которого известны точные свойства спектра решений и ядра (в частности, разложение ядра в ряд Гильберта-Шмидта). Исходя из этих свойств, формулируется строго обоснованный численный метод и приводится пример конкретных расчетов энергетического спектра по этому методу. Затем основной математический результат о разложении ядра уравнения получает обобщение на случай спинор-спинорного уравнения БС в лестничном приближении. На основе разработанных методов рассматривается простейшая релятивистская модель дейтрона – спинор-спинорное уравнение БС с обменом скалярным мезоном. Приводятся полученные результаты его решения и анализируется физическая адекватность модели на примерах вычисления некоторых наблюдаемых величин (в частности, с использованием полученного решения исследуются сечение и тензорная анализирующая способность T_{20} в реакции $pD \rightarrow pX$). Здесь также описывается реалистическая модель дейтрона, которая будет использована в последующих главах.

В третьей главе рассматриваются реакции расщепления дейтрона протонами. Первая ее часть содержит анализ процесса фрагментации $pD \rightarrow pnp$ поляризованного дейтрона протонами для кинематических условий синхротрона COSY. Целью исследований является получение предсказаний для планируемых экспериментов. В приближении однонуклонного обмена вычисляются неполяризованное сечение, тензорная анализирующая способность T_{20} и передача поляризации $\kappa_{D \rightarrow p}$, производится аналитическое выделение и численный анализ релятивистских эффектов, обусловленных вкладами P -волн. Вводится важное понятие волновых функций Бете-Солпитера, которые рассматриваются как аналоги нерелятивистских S - и D -компонент дейтрона, и дают доминирующий вклад во все наблюдаемые величины, по аналитической форме в точности совпадающий с нерелятивистскими результатами. Во второй части третьей главы проводится теоретическое исследование реакции перезарядки $p\bar{D} \rightarrow n(pp)$ при малых передачах импульса и малых энергиях возбуждения pp -пары, для промежуточных и высоких начальных энергий (Дубна, COSY). Описывается динами-

ческая модель рассматриваемой реакции в подходе БС, вычисляется аналитически матричный элемент процесса и обсуждаются сделанные приближения, основное из которых – приближение плоской 1S_0 -волны для конечной pp -пары. Приведены результаты численных расчетов сечения и тензорной анализирующей способности T_{20} , их анализ и сопоставление с экспериментальными данными. Из проведенного рассмотрения этой реакции следует важный вывод о возможности использования ее в качестве базовой для создания тензорного дейтронного поляриметра для промежуточных и высоких энергий, доступных на синхротроне COSY.

В четвертой главе представлена теоретическая модель реакции упругого pD -рассеяния назад. В рамках приближения одноуклонного обмена обсуждается ряд наблюдаемых величин из полного набора: в соответствии с разрабатываемым методом анализа в результатах вычислений выделяются доминирующие положительно-энергетические вклады, имеющие нерелятивистские аналоги, и релятивистские эффекты – поправки от лоренц-буста и вклады P -волн. Приведены аналитические и численные результаты, производится сопоставление с доступными экспериментальными данными. Обнаружены наблюдаемые величины, для которых учет релятивистских эффектов является очень существенным. Приводится пример интерпретации релятивистских поправок как вкладов от мезонообменных токов, известных из нерелятивистского описания. Для этого вводится так называемое приближение одной итерации для P -волн, которое позволяет явно выразить $^3P_1^{+-}$ - и $^1P_1^{+-}$ -компоненты через нерелятивистские S - и D -волны в дейтроне. Конечный результат для амплитуд процесса оказывается близким к нерелятивистским оценкам токов рождения $N\bar{N}$ -пар. В дополнение к одноуклонному обмену изучается также вклад в механизм реакции диаграмм с обменом π -мезоном (треугольных диаграмм). Влияние их учета на численные результаты исследуется для сечения, тензорной анализирующей способности T_{20} и передач поляризации $\kappa_{D \rightarrow p}$ и $\kappa_{p \rightarrow p}$. Обнаружено, что треугольные диаграммы существенно улучшают согласие с данными для сечения, тогда как изменения в поля-

ризационных характеристиках, являясь позитивными, гораздо менее значительны.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, представляемые к защите.

Приложения А, В и С содержат справочный материал и некоторые технические детали. В приложении А приведены ковариантные формы записи амплитуд БС; в приложение В вынесены некоторые громоздкие кинематические выражения; приложение С содержит общие сведения о спиральных вращениях Вика.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

1. Впервые найдено разложение ядра спинор-спинорного уравнения БС по биортонормальному базису его решений. На этой основе разработан метод численного анализа уравнения БС в лестничном приближении, который легко обобщается на достаточно широкий класс ядер взаимодействия и позволяет найти спектр масс и волновые функции двухчастичных связанных систем. Пригодность метода продемонстрирована на примере вычисления спектра системы двух скалярных частиц. Численно выявлена преемственность свойств уравнения БС по отношению к обычному уравнению Шредингера, как, например, появление кулоновского вырождения в спектре при приближении массы обменной частицы к нулю.
2. Численно исследована простейшая релятивистская модель дейтрона на основе спинор-спинорного уравнения БС со скалярным взаимодействием. Показано, что полученные решения удовлетворительно описывают зарядовые и спиновые плотности нуклонов при малых импульсах. Рассмотрена реакция $pD \rightarrow pX$ и вычислены ее сечение и тензорная анализирующая способность T_{20} . Результаты являются самосогласованными и допускают прозрачную физическую интерпретацию.
3. В ходе детального анализа свойств численного решения уравне-

ния БС со скалярным взаимодействием была исследована сходимость итерационного процесса. Показано, что, например, P -волны в дейтроне можно с хорошей точностью получить как результат первой итерации от нерелятивистских S - и D -волн. Благодаря этому открывается возможность интерпретации релятивистских P -волн в терминах вкладов, появляющихся в нерелятивистских подходах от диаграмм типа "катастрофических", парных токов $N\bar{N}$ и т.д.

4. В рамках подхода БС разработан общий метод классификации и анализа релятивистских эффектов в наблюдаемых величинах реакций. Метод позволяет идентифицировать и изучить по отдельности вклады положительно-энергетических компонент и релятивистские поправки – эффекты лоренц-буста участвующих в реакции состояний и вклады отрицательно-энергетических волн.
5. Аналитически выделены релятивистские эффекты в реакции фрагментации дейтрона. С учетом кинематических условий планируемых на COSY экспериментов представлены численные оценки этих эффектов в сечении, тензорной анализирующей способности T_{20} и передаче поляризации $\kappa_{D \rightarrow p}$. Показано, что запланированные эксперименты могут дать детальную информацию об эффектах, связанных с выходом за рамки импульсного приближения.
6. Проведен релятивистский анализ реакции перезарядки $p\bar{D} \rightarrow n(pp)$ при малых передачах импульса и малых энергиях возбуждения pp -пары. Представлены результаты численных расчетов дифференциальных сечений и тензорной анализирующей способности T_{20} . Предсказана возможность использования этой реакции в качестве базовой для создания тензорного дейтронного поляриметра при промежуточных и высоких энергиях, доступных на синхротроне COSY, а также для получения дополнительных сведений об элементарной амплитуде нуклон-нуклонной перезарядки.
7. Впервые проведен полный анализ релятивистских эффектов в уп-

ругом pD -рассеянии на 180° в подходе БС. Получены численные оценки эффектов лоренц-буста и других релятивистских эффектов в сечении и различных поляризационных наблюдаемых. Показано, что в полном наборе поляризационных наблюдаемых, предложенном для реконструкции амплитуд реакции, существуют величины, для которых учет релятивистских поправок играет принципиально важную роль. Это, в частности, те наблюдаемые, которые тождественно равны нулю в нерелятивистских подходах, и их экспериментальное исследование может дать прямую информацию о релятивистских эффектах в дейтроне.

8. Представлен анализ эффектов пионного обмена в упругом pD -рассеянии назад в подходе БС. Обнаружено, что механизм однопионного обмена играет весьма существенную роль в описании неполяризованного сечения и существенно улучшает согласие с данными, тогда как его вклады в поляризационные наблюдаемые относительно малы.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. С.М. Доркин, Л.П. Каптарь, С.С. Семих, "Об энергетическом спектре уравнения Бете-Солпитера", Ядерная Физика **60** (1997) 1784–1798.
2. L.P. Kaptari, B. Kämpfer, S.M. Dorkin, S.S. Semikh, "Relativistic description of the deuteron break-up reactions", Phys. Lett. **B404** (1997) 8–14.
3. L. P. Kaptari, B. Kämpfer, S. M. Dorkin, S. S. Semikh, "Elastic proton-deuteron backward scattering: relativistic effects and polarization observables", Phys. Rev. **C57** (1998) 1097–1111.
4. L.P. Kaptari, B. Kämpfer, S.M. Dorkin, S.S. Semikh, "Pion-exchange effects in elastic backward proton-deuteron scattering", Few Body Syst. **27** (1999) 189–206.

5. С.М. Доркин, Л.П. Каптарь, В. Кэмпфер, С.С. Семих, "Реакция перезарядки $pD \rightarrow n(pp)$ в подходе Бете-Солпитера", Ядерная Физика **65** (2002) вып. 3 (принято в печать); препринт ОИЯИ, Р4-2000-219.
6. С.М. Доркин, Л.П. Каптарь, С.С. Семих, "Релятивистская модель дейтрона в подходе Бете-Солпитера", в сборнике научных трудов Тверского госуниверситета "Теория квантовых систем с сильным взаимодействием", стр.40-52, Тверь, 1995 г.
7. С.М. Доркин, Л.П. Каптарь, С.С. Семих, "Об энергетическом спектре уравнения Бете-Солпитера", в сборнике трудов Первой открытой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ (препринт ОИЯИ Д-97-376), стр. 55-58.
8. В.В. Буров, С.Г. Бондаренко, Л.П. Каптарь, С.С. Семих, С.М. Доркин, "Релятивистский дейтрон", в сборнике научных трудов "Кварки в ядрах и релятивистская ядерная динамика" (под ред. проф. Б.Л. Резника), стр. 56-88, изд-во ДВГУ, Владивосток, 1997.
9. S. S. Semikh, S. M. Dorkin, L. P. Kaptari, V. Kämpfer, "Charge-exchange reaction $pD \rightarrow n(pp)$ in the Bethe-Salpeter approach", in: Proc. of XV Int. Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics" (Eds. A.M. Baldin, V.V. Burov, A.I. Malakhov), vol.1, p.95-100, JINR, Dubna, 2001.
10. С.С. Семих, "Реакция перезарядки $pD \rightarrow n(pp)$ в подходе Бете-Солпитера", в сборнике трудов Пятой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2001 г.), стр. 161-163, изд-во ИЦ ВНИИгеосистем, Москва, 2001.
11. S. S. Semikh, S. M. Dorkin, L. P. Kaptari, V. Kämpfer, "Elastic proton-deuteron backward scattering", in: Annual Report 1997, Forschungszentrum Rossendorf, Institute of Nuclear and Hadron Physics, p. 35.
12. S.S. Semikh, S.M. Dorkin, L.P. Kaptari, "On the energy spectrum of the Bethe-Salpeter equation", in: Proc. of IV Int. Symposium "Dubna Deuteron-97", JINR, Dubna, 2001 (*in press*).
13. L. P. Kaptari, V. Kämpfer, S. M. Dorkin, S. S. Semikh, "Backward $pD \rightarrow Dp$ scattering: one-nucleon exchange and "triangle" diagram reviewed within the Bethe-Salpeter approach", in: Proc. of V Int. Symposium "Dubna Deuteron-99", JINR, Dubna, 2001 (*in press*).

Рукопись поступила в издательский отдел
16 мая 2001 года.