

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

Цирова Наталья Александровна

Электромагнитная структура двухчастичных систем
при больших переданных импульсах

Специальность 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Самара – 2009

Работа выполнена на кафедре общей и теоретической физики в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Самарский государственный университет"

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, доцент,
Крутов Александр Федорович
(Самарский государственный университет, г. Самара)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Галкин Владимир Олегович
(ВЦ РАН, г. Москва)

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Дудко Лев Владимирович
(НИИЯФ МГУ, г. Москва)

Ведущая организация:


Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, г. Дубна Московской области.

Защита диссертации состоится "27" Февраля 2009 г. в 15⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 5 ("19-й корпус").

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан "20" января 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
профессор

 С.И. Страхова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена проблеме релятивистского описания составных систем в ядерной физике и физике частиц. В работе развивается один из наиболее распространенных методов релятивистского описания — релятивистская квантовая механика (РКМ). В рамках мгновенной формы РКМ исследуется электромагнитная структура двухчастичных систем: простейшей двухнуклонной системы — дейтрона и двухкварковой — пиона при больших переданных импульсах.

В основе диссертации лежат результаты работ, выполненных автором в 2005-2008 гг. в Самарском государственном университете.

Актуальность темы. Все атомы, ядра и большинство так называемых элементарных частиц представляют собой составные системы. Именно поэтому роль корректных методов количественного описания структуры составных систем является очень важной. В нерелятивистской динамике составных систем имеются достаточно надежные методы, опирающиеся на использование модельных или феноменологических потенциалов взаимодействия. Однако для описания процессов, протекающих с участием составных систем, при больших энергиях необходимо развитие релятивистских методов. Более того, даже при низких энергиях описание, например, систем, содержащих легкие кварки, обязательно требует учета релятивистских эффектов. Следует, однако, подчеркнуть, что количественное описание релятивистских адронных составных систем представляет собой весьма сложную задачу, которая в полном объеме вряд ли может быть решена в ближайшие годы, поскольку для этого нужно решить многотельную релятивистскую задачу, да и то еще с далеко не всегда хорошо известным взаимодействием. Применение методов теории поля для решения этой проблемы сталкивается с серьезными трудностями. Так, например, известно, что пертурбативная КХД не может быть применена к проблеме связанных состояний кварков. В связи с этим для описания составных адронных систем получили широкое распространение т.н. релятивистские составные модели.

Релятивистские методы описания основываются, как известно, на требовании локальности и ковариантности взаимодействий относительно группы Пуанкаре; удовлетворяя этим условиям, мы приходим к общепринятой локальной релятивистской квантовой теории поля, которую можно сформули-

ровать на языке операторов рождения и уничтожения частиц. Существенным затруднением при этом является неограниченное число частиц в теории, что приводит к необходимости оперировать с бесконечным числом степеней свободы. В случае описания систем с сильным взаимодействием это, как известно, приводит к серьезным вычислительным проблемам. Данная трудность преодолена в феноменологических релятивистских моделях с фиксированным числом частиц. Такие релятивистски инвариантные методы описания связанных состояний можно разделить на две большие группы: релятивистские квантовые механики и пропагаторные динамики. Методам каждой группы присущи свои достоинства и недостатки. Так, например, существенным достоинством РКМ является исключение состояний с отрицательной энергией, что значительно упрощает расчеты, однако недостатком такого выбора является несохранение свойств локальности и явной ковариантности, присущих теории поля. При включении состояний с отрицательной энергией в пропагаторы частиц мы приходим к пропагаторным динамикам. Недостатком пропагаторных динамик является сложность вычислений в связи с наличием состояний с отрицательной энергией, а также сложность интерпретации результатов. Эти недостатки обходятся по-разному в каждой конкретной реализации пропагаторной динамики.

РКМ обычно формулируется в трех основных формах: мгновенной форме, точечной форме и динамике светового фронта. В диссертации использован метод мгновенной формы РКМ, разработанный таким образом, чтобы удовлетворить условиям релятивистской ковариантности при описании электрослабых свойств систем с конечным числом степеней свободы.

В рамках РКМ в диссертации изучается электромагнитная структура простейших двухчастичных систем: дейтрона как нуклон-нуклонной системы и пиона как двухкварковой системы. Их исследованию посвящено в последнее время много работ. Особенность этих систем заключается в том, что они могут быть экспериментально изучены в широкой области переданных импульсов: от небольших до таких, где может быть применима пертурбативная КХД (пКХД). Изучение электромагнитной структуры дейтрона и пиона является, в частности, одним из приоритетных пунктов программы JLab "12 GeV Upgrade". Модернизация ускорителя на непрерывном электронном пучке позволит быстро набрать необходимую статистику и получить экспериментальные данные по упругому электрон-дейтронному и электрон-пионному

рассеянию при больших переданных импульсах с высокой точностью. И для дейтрона, и для пиона в этих экспериментах предсказывается проявление режима пКХД. Вообще говоря, вопрос о переходе от непертурбативного режима к пКХД до сих пор является открытым. Проведенные к настоящему времени эксперименты пока не достигли той области переданных импульсов, когда описание в терминах пКХД является оправданным. Отметим также, что до сих пор нет единства даже в предсказаниях относительно нижней границы перехода к режиму пКХД. Так, для дейтрона она варьируется в пределах 9-20 ГэВ². Что касается пиона, то ожидается, что для его описания пКХД можно будет применять при более низких квадратах переданных импульсов по сравнению с другими составными системами, возможно, начиная с 5 ГэВ².

Предсказания пКХД справедливы для асимптотически больших переданных импульсов, так что область будущих экспериментов JLab может рассматриваться как асимптотическая для дейтрона и пиона. В связи с этим появляется задача изучения асимптотического поведения формфакторов дейтрона и пиона при $Q^2 \rightarrow \infty$. Решение этой задачи в рамках составных моделей позволяет, в частности, прояснить проблему перехода от непертурбативного режима к пертурбативному. Таким образом, исследование формфакторов пиона и дейтрона при больших переданных импульсах, проводящееся в диссертационной работе, инициировано планируемыми экспериментами JLab, лежит в русле современных теоретических исследований этих систем и, несомненно, является актуальным.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Сформулирована и доказана теорема об асимптотическом разложении n -мерных интегралов некоторого специального вида.

2. При помощи доказанной теоремы получен асимптотический ряд для электромагнитных формфакторов дейтрона в релятивистском и нерелятивистском импульсном приближениях. Показано, что в современном эксперименте JLab по упругому электрон-дейтронному рассеянию достигнута асимптотика релятивистской нуклон-нуклонной модели дейтрона.

3. Показано, что при больших переданных импульсах для учета кварковой структуры дейтрона необходимо модифицировать волновую функцию дейтрона в нуле. Указан явный вид модификации, который дает асимптотику, совпадающую с асимптотикой, предсказываемой пКХД.

4. Получен вклад асимптотики обменных мезонных токов в формфакторы дейтрона, т.е. проведено исследование электромагнитной структуры дейтрона за рамками импульсного приближения. Из сравнения асимптотических расчетов с современными экспериментальными данными получены ограничения на явный вид вершинных мезон-нуклонных формфакторов, в частности, отказ от модели векторной мезонной доминантности для $\rho\pi\gamma$ -формфактора.

5. При помощи доказанной теоремы получен асимптотический ряд для электромагнитного формфактора пиона. Показано, что современные экспериментальные данные по упругому пион-электронному рассеянию описываются релятивистской кварковой моделью при наложении ограничений на массу конститuentных кварков.

Научная новизна и практическая ценность работы. Для исследования асимптотического поведения электромагнитных формфакторов дейтрона и пиона при больших переданных импульсах необходимо провести асимптотическое разложение двукратных интегралов, которые входят в соответствующие формулы. Для этого в диссертации доказана теорема об асимптотическом разложении n -кратных интегралов, точка максимума подынтегральной функции которых лежит на границе области интегрирования, а зависимость функции в экспоненте от большого параметра более общая, нежели в классическом методе Лапласа. С помощью доказанной теоремы исследовано асимптотическое поведение формфакторов дейтрона и пиона, оценен вклад мезонных токов в дейтронные формфакторы, получены ограничения на плохо известные вершинные мезон-нуклонные формфакторы, на параметры составной кварковой модели. Получен фит экспериментальных данных по упругому электрон-дейтронному рассеянию при наибольших достигнутых сегодня переданных импульсах, произведено сравнение теоретической асимптотики с фитом. Сделан вывод о достижении экспериментом асимптотики, предсказываемой двухнуклонной моделью дейтрона и релятивистской кварковой моделью пиона.

Полученные в работе результаты могут найти применение при обработке результатов проведенных и планировании новых экспериментов по исследованию электромагнитной структуры составных систем в различных ускорительных центрах мира, в частности, при интерпретации экспериментов JLab.

Личный вклад автора является определяющим при получении результатов, составивших основу диссертации. В частности, автором лично разработан метод асимптотического разложения кратных интегралов некоторого специального вида, проведен расчет асимптотики формфакторов дейтрона и пиона. Опираясь на результаты асимптотических расчетов, автор получил ограничения на вершинные мезон-нуклонные формфакторы, поведение дейтронной волновой функции на малых расстояниях, параметры составной кварковой модели.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных форумах: международной конференции "Квантовая теория поля и физика высоких энергий (QFTHEP)" (Самара-Саратов, 2003), конференции "Проблемы связанных состояний в квантовой теории поля" (Самара, 2004), XVII и XIX международном семинаре им. А.М. Балдина по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 2004, 2008), конференции "Концепции симметрии и фундаментальных полей в квантовой физике XXI века" (Самара, 2005), конференции "Проблемы фундаментальной физики XXI века" (Самара, 2005), научной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" (Москва, 2005, 2007; Протвино, 2008), X международном семинаре по квантовой оптике (Самара, 2007), рабочем семинаре GSI (Дармштадт, Германия, 2008), международной конференции "Light Cone 2008: Relativistic Nuclear and Particle Physics" (Мулюз, Франция, 2008), международной конференции по математической физике и ее приложениям (Самара, 2008), а также на регулярных научных семинарах в Самарском государственном университете, НИИЯФ МГУ, ЛТФ ОИЯИ.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе: в журналах из списка ВАК - 4, в журналах, не входящих в список ВАК - 4, в трудах конференций - 5. Список работ приведен в конце реферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 157 наименований, 2 приложений. Она содержит 12 рисунков. Общий объем диссертации составляет 110 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит краткую характеристику темы исследования, формулировку целей работы и описание структуры диссертации. В конце введения отмечается личный вклад автора в полученные результаты и апробация работы.

Первая глава. Методы описания составных систем. Глава носит обзорный характер. В ней рассматриваются различные теоретические подходы к описанию составных систем, в частности, дейтрона и пиона.

Первый параграф посвящен рассмотрению релятивистских моделей описания двухчастичных состояний. Описано разделение релятивистских методов на 2 основные группы: РКМ и пропагаторные динамики. Подробно рассмотрены основы и характерные особенности каждой группы, их достоинства и недостатки.

Во втором параграфе рассматриваются основные релятивистские подходы к описанию дейтрона. Кратко изложено построение уравнения Бете-Солпитера и его различных квазипотенциальных редукций в конкретных моделях пропагаторных динамик, дан обзор результатов. Изложено построение матричного элемента оператора тока в конкретных моделях РКМ, указаны их основные трудности, результаты.

В третьем параграфе рассматриваются основные подходы к описанию составных кварковых систем, в частности, пиона. Рассмотрены основные положения квантовой хромодинамики, связь между КХД и составной кварковой моделью (СКМ), различные способы релятивизации СКМ (модель Намбу-Йона-Лазинио, квазипотенциальный подход и др.)

В четвертом параграфе рассмотрено применение мгновенной формы РКМ в формулировке Крутова и Троицкого к описанию составных систем. Именно на этом подходе основана диссертационная работа. Узловым моментом этого метода является построение матричного элемента оператора тока изначально релятивистски ковариантным образом с помощью общего метода параметризации матричных элементов локальных операторов, предложенного Чешковым и Широковым. Приведены формулы для электромагнитных формфакторов дейтрона и пиона в виде двукратных интегралов от произведения феноменологических волновых функций и свободного двухчастичного формфактора, описывающего электромагнитные свойства двухчастичной си-

системы без взаимодействия. Структура формфактора составной системы имеет следующий вид:

$$F_c(Q^2) = \int d\sqrt{s} d\sqrt{s'} \varphi(s) g_0(s, Q^2, s') \varphi(s'), \quad (1)$$

s, s' — квадраты инвариантных масс двухчастичной системы в начальном и конечном состоянии, $\varphi(s)$ — волновая функция в смысле РКМ, $g_0(s, Q^2, s')$ — свободный двухчастичный формфактор, описывающий электромагнитные свойства двухчастичной системы без взаимодействия. Показано, что в таком подходе релятивистская волновая функция составной системы отличается от нерелятивистской только условиями нормировки с релятивистской плотностью состояний.

Вторая глава. Асимптотическое разложение дейтронных формфакторов посвящена анализу представления дейтронных формфакторов и нахождению их асимптотического разложения.

Первый параграф посвящен нахождению асимптотики интегралов некоторого специального вида. Анализ подынтегральных функций в формулах для формфакторов дейтрона и пиона показывает, что интегралы такого вида не сводятся к классическим интегралам, рассматриваемым в литературе по асимптотическим оценкам. Для интегралов, используемых в диссертации, в литературе даются только лишь некоторые оценки. В данной главе доказана теорема об асимптотическом разложении n -кратных интегралов, у которых точка максимума находится на границе области интегрирования, причем она не является точкой экстремума:

$$F(\lambda) = \int_{\Omega} f(\lambda, x) \exp[S(\lambda, x)] dx. \quad (2)$$

Сформулирована и доказана лемма, определяющая, при каких условиях можно ограничиться рассмотрением только малой окрестности точки максимума при интегрировании. Получен асимптотический ряд для интегралов, соответствующих условиям леммы.

Во втором параграфе рассматривается представление формфакторов дейтрона в мгновенной форме релятивистской квантовой механики в виде двойных интегралов:

$$G_i^R(Q^2) = A_i \sum_{l,l'} \int d\sqrt{s} d\sqrt{s'} \varphi_l(s) g_{0i}^{ll'}(s, Q^2, s') \varphi_{l'}(s'), \quad (3)$$

$G_i^R(Q^2)$ — релятивистские зарядовый, квадрупольный и магнитный дипольный формфакторы дейтрона, $i = C, Q, M$; $A_C = 1$, $A_Q = \frac{2M_d^2}{Q^2}$, $A_M = -M_d$. Исследован переход от дейтронных волновых функций юкавского типа к волновым функциям, разложенным по полиномам Лагерра. Такое разложение удобно для нахождения асимптотики дейтронных формфакторов.

Третий параграф посвящен получению с помощью доказанной теоремы асимптотического ряда для дейтронных формфакторов с дейтронными волновыми функциями, представленными в виде разложения по полиномам Лагерра.

Третья глава. Асимптотика дейтронных формфакторов и современный эксперимент посвящена анализу асимптотического поведения дейтронных формфакторов при больших переданных импульсах и его сравнению с экспериментальными данными при наибольших достигнутых сегодня переданных импульсах.

В первом параграфе рассматривается нахождение асимптотики дейтронных формфакторов в терминах волновых функций юкавского типа. За основу мы берем ряд, полученный в терминах волновых функций, разложенных по полиномам Лагерра. В этом ряде мы возвращаемся к волновым функциям типа Юкавы, получая асимптотический ряд в их терминах. Асимптотика т.н. обобщенного дейтронного формфактора, который выражается через формфакторы дейтрона, находится для нерелятивистского (NR) и релятивистского (R) случаев:

$$F_d^{NR}(Q^2) \sim Q^{-11}, \quad (4)$$

$$F_d^R(Q^2) \sim Q^{-8}. \quad (5)$$

Второй параграф посвящен сравнению нерелятивистской и релятивистской асимптотик. Изучается роль релятивистских поправок в асимптотической области. Производится сравнение асимптотических расчетов с полученным в работе фитом экспериментальных данных по упругому электрон-дейтронному рассеянию при наибольших достигнутых в настоящее время переданных импульсах:

$$F_d^{exp}(Q^2) \sim \frac{1}{(Q^2)^{3.76 \pm 0.41}}. \quad (6)$$

Сравнение показывает, что современный эксперимент вышел на асимптотику релятивистской нуклон-нуклонной модели. Далее исследуется соответствие

между феноменологической нуклонной моделью и квантовой хромодинамикой. Как известно, при больших переданных импульсах существует строгое предсказание на степень спада по переданному импульсу, следующее из правил кваркового счета и пертурбативной квантовой хромодинамики:

$$F_d(Q^2) \sim Q^{-10} . \quad (7)$$

В диссертационной работе получено условие на поведение дейтронных волновых функций в нуле в нуклон-нуклонной модели, налагая которое, можно получить асимптотику дейтронных формфакторов, совпадающую с асимптотикой кваркового счета и пКХД:

$$u_0(r) \sim r + a r^3 , \quad u_0''(0) = 0 . \quad (8)$$

Наконец, в третьем параграфе исследуется роль вкладов обменных мезонных токов в электромагнитные формфакторы дейтрона. В выражения для обменных мезонных токов входят плохо известные в настоящее время вершинные мезон-нуклонные формфакторы. Из сравнения рассчитанной асимптотики с фитом экспериментальных данных получены ограничения на $\pi NN-$, $\rho NN-$ и $\rho\pi\gamma$ -формфакторы. Так, например, для $\rho\pi\gamma$ -формфактора при больших переданных импульсах необходим выход за рамки модели векторной мезонной доминантности.

Четвертая глава. Электромагнитная структура пиона при больших переданных импульсах посвящена исследованию поведения пионного формфактора в области больших переданных импульсов.

Первый параграф посвящен изучению поведения пионного формфакторов в зависимости от параметров составной кварковой модели в области наибольших достигнутых в настоящее время переданных импульсов, а также в области ближайших экспериментов JLab. Исследуется также зависимость от феноменологических пионных волновых функций. Получено, что при больших переданных импульсах важен не столько вид волновой функции, сколько значение массы кварка. Установлено, что при больших переданных импульсах следует использовать малые массы кварков: $m \simeq 0.22$ ГэВ.

Второй параграф посвящен изучению асимптотического разложения пионного формфактора при больших переданных импульсах. Асимптотика изучается как в пределе точечных кварков, так и с введением формфакторов кварков. Показано, что для успешного описания экспериментальных данных

необходимо вводить в модель структуру кварков. Проводится аналогия с моделью Намбу-Йона-Лазинио. Также показано, что в пределе малой массы кварка асимптотика составной кварковой модели совпадает с асимптотикой пертурбативной КХД: $F_\pi(Q^2)Q^2 = \text{Const}$ (с точностью до логарифмических поправок). В связи с этим делается предположение о том, что ожидаемые экспериментальные данные по упругому электрон-пионному рассеянию могут сигнализировать не о наступлении режима пКХД, а о наступлении асимптотического режима СКМ с зависимостью массы кварка от переданного импульса. Предлагается явный вид такой зависимости.

Заключение. В заключении сформулированы основные результаты, представленные в диссертации.

Приложение 1 содержит формулы для свободных двухчастичных нерелятивистских дейтронных формфакторов.

Приложение 2 содержит формулы для свободных двухчастичных релятивистских дейтронных формфакторов.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Крутов А.Ф., Троицкий В.Е., Цирова Н.А. Кварковые степени свободы в дейтроне и нуклон-нуклонная динамика// Вестник СамГУ. - 2006.Т.43. - С. 100–111.
2. Krutov A.F., Troitsky V.E., Tsirova N.A. Asymptotic estimation of some multiple integrals and the electromagnetic deuteron form factors at high momentum transfer// J. Phys. A: Math. Theor. - 2008. V.41. - 255401.
3. Крутов А.Ф., Троицкий В.Е., Цирова Н.А. Вклад обменных мезонных токов в электромагнитную структуру дейтрона при больших переданных импульсах// ЯФ. - 2009.Т.72. - С.169-174.
4. Krutov A.F., Troitsky V.E., Tsirova N.A. Asymptotics of the deuteron form factors in the nucleon model and JLab experiments// Phys.Rev.C. - 2008.V.78. - 044002.
5. Krutov A.F., Troitsky V.E., Tsirova N.A. Relativistic asymptotics of the deuteron and pion form factor//PoS. - LC 2008. - 054.
6. Krutov A.F., Troitsky V.E., Tsirova N.A. Mathematical analysis of the asymptotic behavior of the electromagnetic deuteron form factors at high momentum transfer// Proc. SPIE. - 2008.V.7024. - 702410.
7. Крутов А.Ф., Троицкий В.Е., Цирова Н.А. Математический анализ асимптотического поведения электромагнитных формфакторов дейтрона при больших переданных импульсах// Теоретическая физика. - 2005.Т.6. - С. 71–85.
8. Крутов А.Ф., Троицкий В.Е., Цирова Н.А. Новые аспекты в асимптотике электромагнитных формфакторов дейтрона// Теоретическая физика. - 2004.Т.5. - С.17–26.
9. Krutov A.F., Troitsky V.E., Tsirova N.A. New aspects in the asymptotics of the deuteron electromagnetic form factors// Book of abstracts of the XVII International Baldin Seminar on NEPP. Dubna 2004. P.47

10. Krutov A.F., Troitsky V.E., Tsirova N.A. New aspects in the asymptotics of the deuteron electromagnetic form factors// Proceedings of the XVII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic nuclear physics and quantum chromodynamics". Dubna, 2005. v.I, pp.194-199.
11. Крутов А.Ф., Троицкий В.Е., Цинова Н.А. Электромагнитная структура дейтрона на малых расстояниях// Сборник тезисов конференции "Концепции симметрии и фундаментальных полей в квантовой физике XXI века". Самара 2005. С.60-61.
12. Крутов А.Ф., Троицкий В.Е., Цинова Н.А. Формфакторы составных систем в области больших переданных импульсов// Сборник тезисов Международной конференции по математической физике и ее приложениям. Самара 2008. С. 104-106.
13. Krutov A.F., Troitsky V.E., Tsirova N.A. Deuteron and pion form factors at high momentum transfer and JLab experiments //Book of abstracts of the XIX International Baldin Seminar on HEPP. Dubna 2008. P.85

Подписано в печать 11 января 2009 г.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1601

443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1.

Отпечатано ООО: "Универс-групп"