

Полежаев Роман Геннадьевич

Описание процессов рассеяния и распада составных кварковых систем методами релятивистской квантовой механики с фиксированным числом частиц

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Самара - 2016

Работа выполнена на кафедре общей и теоретической физики в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева"

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор
Крутов Александр Федорович
(Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара)

доктор физико-математических наук, профессор
Троицкий Вадим Евгеньевич
(Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына, г. Москва)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Андрианов Александр Андреевич
(Санкт-Петербургский государственный университет)
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Галкин Владимир Олегович
(Институт образовательной информатики Федерального государственного
учреждения "Федеральный исследовательский центр"
"Информатика и управление" Российской академии наук")

Ведущая организация:

Лаборатория теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

Защита диссертации состоится "____" _____ 2016 г. в ____ 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 "____" _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 501.001.77, доктор физико-математических наук,
профессор

С.И. Страхова

Диссертационная работа посвящена проблеме релятивистского описания составных систем в ядерной физике и физике частиц. В работе развивается один из наиболее распространенных вариантов релятивистской составной модели — релятивистская квантовая механика с фиксированным числом частиц (РКМ), называемая также Пуанкаре-инвариантной квантовой механикой.

Центральным пунктом развиваемого подхода является построение операторов токов для составных систем. В диссертационной работе в рамках мгновенной формы РКМ разработана процедура построения матричных элементов электрослабых токов, недиагональных по полному угловому моменту. Расчеты электрослабых свойств составных кварковых систем проводились в рамках естественного для составных моделей импульсного приближения (ИП). В диссертации используется т.н. релятивистское модифицированное импульсное приближение (МИП), сформулированное в терминах приведенных матричных элементов - формфакторов. В отличие от ИП МИП не приводит к нарушению условия лоренц-ковариантности оператора тока, а в случае электромагнитного тока - закона сохранения. Разработанный в диссертации метод построения матричных элементов токов применен для вычисления константы лептонного распада ρ -мезона, расчета переходного формфактора в распаде $\rho \rightarrow \pi\gamma^*$, а также среднеквадратичного радиуса ρ -мезона. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В рамках мгновенной формы РКМ проведено согласованное описание электрослабых характеристик π - и ρ - мезонов.

В работе на примере описания электромагнитной структуры пиона показана эквивалентность основных форм РКМ при условии использования развитой в диссертации процедуры построения электрослабых токов.

В основе диссертации лежат результаты работ, выполненных автором в 2010-2015 гг. в Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева (бывшем Самарском государственном университете).

Актуальность темы

Описание электрослабых свойств составных кварковых систем является актуальной задачей физики элементарных частиц уже на протяжении многих лет. Изучение этих систем в различных подходах позволяет получить информацию о пространственно-временной картине взаимодействия кварков на различных масштабах энергий, понять механизмы формирования составных систем на основе кварк-глюонной теории сильных взаимодействий, выявить эффекты вне Стандартной модели. Интерес к этим исследованиям сильно возрос в последние годы. Это связано в первую очередь с серией новых экспериментальных результатов, полученных на различных ускорителях.

В последнее время был проведен ряд экспериментов по изучению радиационных распадов векторных мезонов. Так, коллаборациями NA 60, KLOE-2 были измерены переходные формфакторы в реакциях $\omega \rightarrow \pi\gamma^*$, $\phi \rightarrow \eta\gamma^*$. В коллаборации HERMES рассматривались жесткие эксклюзивные процессы электророждения ω - мезонов при энергиях 27.6 GeV , полученных при рассеянии позитронных и электронных пучков на поперечно поляризованной водородной мишени. Изучение данных процессов позволяет не только измерить переходной формфактор $F_{\pi\omega}(Q^2)$, но и рассчитать по нему такие электрослабые характеристики процесса как магнитный момент перехода, среднеквадратичный радиус перехода, ширина распада и т.д.

Изучение коллаборацией A2 зависимости парциальной ширины от квадрата двухфотонной инвариантной массы в распаде $\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$ позволило получить более точное значение ширины данного распада.

В программах, осуществляемых Джефферсоновской лабораторией (JLab), проводились эксперименты по рассеянию поляризованных электронов на π - мезонах и протонах. В электрон-протонном рассеянии изучались свойства нуклонного резонанса в процессе $ep \rightarrow e'p'\pi^+\pi^-$. В данных экспериментах удалось обеспечить надежное разделение резонансной и нерезонансной частей сечений, изучить эксклюзивные процессы электророждения протонных состояний, произвести расчет дифференциальных сечений и структурных функций в широком диапазоне переданных импульсов.

В JLab были проведены также новые эксперименты по измерению электромагнитных формфакторов пиона при больших переданных

импульсах. Основная цель этих экспериментов состояла в наблюдении эффектов пертурбативной КХД и изучении переходной области от непертурбативной к пертурбативной кварк-кварковой динамике.

Измерения электромагнитных формфакторов протона в JLab выявили противоречие между результатами поляризационных и неполяризационных экспериментов по рассеянию электронов на протонах - т.н. "нерозенблютовское" поведение электрического протонного формфактора.

Следует отметить в этом ряду проведенные коллаборацией BABAR эксперименты по измерению переходных формфакторов мезонов, где в области квадрата переданного импульса $4 GeV^2 < Q^2 < 40 GeV^2$ наблюдалось отклонение от предсказаний пертурбативной КХД. Это отклонение проявляет себя в росте переходного формфактора $F_{\gamma\gamma^*\rightarrow\pi^0}(Q^2)$ при увеличении переданного импульса, что противоречит результатам квантовой хромодинамики.

Получены новые экспериментальные данные о мезонах, содержащих один тяжелый кварк (B - и D - мезоны), в программах, осуществляемых коллаборациями BABAR, LHCb и другими, где проводились измерения масс, времен жизни, электромагнитных радиусов, относительных ширин полуплеptonных распадов.

В последнее время появилась новая экспериментальная информация по электрослабым свойствам короткоживущих мезонов, таких как ρ -мезон. Так, в процессе $\tau \rightarrow \rho\nu_\tau$ была измерена константа лептонного распада ρ -мезона, а из радиационного перехода $\rho \rightarrow \pi\gamma^*$ получен соответствующий магнитный момент.

Прогресс в экспериментальном изучении перечисленных адронных систем дал новый толчок теоретическому описанию связанных состояний кварков.

Последовательной теорией сильных взаимодействий справедливо считается квантовая хромодинамика, оперирующая бесконечным числом степеней свободы, переносимых кварками и глюонами. Однако, надежные предсказания КХД, как известно, дает для процессов, характеризующихся большими энергиями и переданными импульсами. При этом, например, описание связанных состояний не может быть осуществлено в рамках пертурбативной КХД. В области промежуточных переданных импульсов

и, соответственно, больших расстояний бегущая константа связи α_s велика и теория возмущений неприменима, поэтому для описания такого рода процессов используют, как правило, непertурбативные подходы в рамках различных составных моделей, оперирующих конечным числом степеней свободы.

Одним из таких подходов является восходящая к работам П. Дирака релятивистская квантовая механика с фиксированным числом частиц (РКМ), которая и используется в настоящей диссертационной работе. Суть РКМ заключается в следующем. Как известно, релятивистская инвариантность теории означает существование на гильбертовом пространстве состояний системы унитарного представления неоднородной группы $SL(2, C)$, которая является универсальной накрывающей группы Пуанкаре. Условием релятивистской инвариантности является выполнение коммутационных соотношений алгебры Пуанкаре для генераторов пространственно-временных трансляций \hat{P}^μ и вращений $\hat{M}^{\mu\nu}$. Построение представления $SL(2, C)$ в гильбертовом пространстве сводится к нахождению этих генераторов в терминах динамических переменных системы. При включении взаимодействия в составной системе для сохранения коммутационных соотношений алгебры Пуанкаре оператор взаимодействия приходится включать не только в генератор временных трансляций, как это происходит в нерелятивистском случае, но и в другие генераторы. Генераторы в алгебре Пуанкаре при этом разбиваются на гамильтонианы, т.е. генераторы, содержащие взаимодействие, и на генераторы, не содержащие взаимодействия, которые образуют т.н. кинематическую подгруппу.

В зависимости от выбора кинематической подгруппы Дирак выделил три основных способа описания эволюции релятивистских систем - различные формы динамики: мгновенная форма, точечная форма и динамика на световом фронте.

Важным нерешенным вопросом теории остается эквивалентность этих основных форм динамики. Существующие доказательства эквивалентности выполнены для различных частных процессов и приближений. Например, проведено доказательство равноценности мгновенной формы и динамики на световом фронте в системе отсчета с бесконечным импульсом. Была показана также S -матричная эквивалентность основных форм динамики. Однако, до сих пор не решен вопрос об равнозначности форм динамики

при описании связанных состояний. Таким образом, данная проблема по-прежнему остается актуальной. В диссертационной работе показана эквивалентность основных форм РКМ при расчетах электромагнитных формфакторов составных кварковых систем. В работе получены одинаковые аналитические выражения для электромагнитных формфакторов в рамках мгновенной и точечной форм динамики, а также динамики на световом фронте.

Одной из важных до конца нерешенных теоретических проблем описания электрослабых свойств составных кварковых систем остается проблема построения операторов токов перехода с учетом условий лоренц-ковариантности и сохранения. Данная проблема, вообще говоря, возникает не только в РКМ, но и во всех релятивистских подходах.

В диссертационной работе для построения оператора тока в рамках РКМ используется процедура параметризации матричных элементов локальных операторов. Данный метод в релятивистской теории позволяет выразить матричный элемент любой тензорной размерности через конечное число релятивистски-инвариантных функций - формфакторов. Матричный элемент оператора представляется при этом суммой слагаемых, каждое из которых является произведением ковариантного и инвариантного членов. Ковариантная часть такого представления матричного элемента описывает его трансформационные (геометрические) свойства, а вся динамическая информация о переходе, описываемом данным оператором, содержится в инвариантной части - приведенных матричных элементах или формфакторах. Для построения матричного элемента тока в диссертации используется т.н. модифицированное импульсное приближение (МИП), которое отличается от общепринятого импульсного приближения (ИП) тем, что формулируется в терминах формфакторов, а не исходных матричных элементов. Отметим, что МИП не приводит к нарушению условий ковариантности и сохранения в отличие от общепринятого импульсного приближения. В диссертации развита процедура параметризации для случая матричного элемента тока, недиагонального по полному угловому моменту. В развитом формализме в работе произведены вычисления константы лептонного распада ρ -мезона, расчет переходного формфактора и магнитного момента для процесса радиационного распада $\rho \rightarrow \pi\gamma^*$, а также среднеквадратичного радиуса ρ -мезона. Результаты расчетов хорошо

согласуются с экспериментом.

Целью диссертационной работы является описание электрослабых свойств составных кварковых систем в рамках релятивистской квантовой механики с использованием новой процедуры построения матричных элементов электрослабых токов.

Основные задачи исследования можно сформулировать следующим образом:

1. В рамках мгновенной формы РКМ разработать методику параметризации матричных элементов электрослабых токов, недиагональных по полному угловому моменту.

2. Используя разработанную методику, вычислить константу лептонного распада ρ -мезона.

3. Фиксируя параметры модели из описания электрослабых свойств π -мезона, рассчитать среднеквадратичный радиус ρ -мезона.

4. В рамках мгновенной формы РКМ показать возможность согласованного описания электрослабых характеристик π - и ρ -мезонов.

5. Вычислить переходной формфактор и соответствующий магнитный момент в радиационном распаде $\rho \rightarrow \pi\gamma^*$.

6. С использованием развитого в работе формализма параметризации показать эквивалентность трех основных форм РКМ при описании электромагнитных формфакторов связанных состояний кварков на примере формфактора пиона.

Методы исследования

Описание процессов с участием скалярных и векторных мезонов осуществляется в рамках РКМ. Для построения матричных элементов токов с учетом условий лоренц-ковариантности и сохранения используется процедура параметризации матричных элементов локальных операторов. Вычисление свободных двухчастичных формфакторов, описывающих электрослабые свойства системы невзаимодействующих частиц со спином, производится строгими методами релятивистской кинематики.

Научная новизна и практическая ценность работы

В диссертации в рамках РКМ разработан новый эффективный метод описания процессов рассеяния и распада мезонов. Центральным пунктом

развитого подхода является процедура построения электрослабых токов. В диссертации сформулирован метод построения матричных элементов электрослабых токов, недиагональных по полному угловому моменту - метод параметризации матричных элементов токов перехода. Сформулированное в рамках развитого метода модифицированное импульсное приближение не приводит к нарушению условий лоренц-ковариантности и сохранения тока в отличие от общепринятого импульсного приближения.

В развитом формализме вычислена константа лептонного распада ρ -мезона. Показана возможность согласованного (при одинаковых параметрах модели) описания электрослабых характеристик π - и ρ - мезонов, что является отличительным свойством развиваемого подхода. В частности, без свободных параметров был рассчитан среднеквадратичный радиус ρ -мезона. Результаты расчета удовлетворяют гипотезе Ву и Янга о равенстве зарядового и сильного радиусов, подтвержденной экспериментально для ряда адронов.

В рамках мгновенной формы РКМ проведен расчет переходного формфактора для радиационного перехода $\rho \rightarrow \pi\gamma^*$. Вычислен магнитный момент перехода $\mu_{\pi\rho} = F_{\pi\rho}(0)$. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Для трех основных форм РКМ впервые показана эквивалентность описания электромагнитной структуры пиона, как связанного состояния u - и \bar{d} - кварков. Аналитические выражения для электромагнитного формфактора пиона в развитом в диссертации подходе полностью совпадают в рамках трех основных форм РКМ.

Полученные в диссертации результаты расчетов электромагнитных формфакторов дают информацию о переходном режиме от непертурбативной к пертурбативной кварковой динамике. Проведенное в диссертационной работе согласованное описание электрослабых характеристик π - и ρ - мезонов позволяет зафиксировать параметры составной кварковой модели, а также предсказывать и интерпретировать результаты новых экспериментов.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов диссертации подтверждается использованием общепринятого подхода - релятивистской квантовой механики, строгого метода построения матричных элементов локальных операторов, а также хорошим согласием

полученных результатов с современными экспериментальными данными и совпадением в частных случаях с результатами вычислений в других подходах.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. В рамках мгновенной формы РКМ разработана процедура параметризации матричного элемента электрослабого тока, недиагонального по полному угловому моменту.

2. С использованием разработанной методики проведено описание константы лептонного распада ρ -мезона. Результаты вычислений согласуются с теоретическими вычислениями данной константы в других подходах.

3. Произведен расчет среднеквадратичного радиуса ρ -мезона при фиксированных параметрах модели. Результаты расчета удовлетворяют гипотезе о равенстве зарядовых и сильных радиусов, подтвержденной для ряда адронов.

4. Проведена оценка параметров составной кварковой модели из анализа электрослабых характеристик π - и ρ -мезонов. Получено хорошее описание электрослабых характеристик π - и ρ -мезонов при одинаковых параметрах конститuentных кварков.

5. В рамках развитой методики получены аналитические выражения и численные значения для переходного формфактора $F_{\pi\rho}(Q^2)$ и соответствующего магнитного момента перехода $\mu_{\pi\rho}$ в распаде $\rho \rightarrow \pi\gamma^*$.

6. Показана эквивалентность трех основных форм РКМ на примере описания электромагнитного формфактора пиона. Получены одинаковые аналитические выражения для электромагнитного формфактора пиона в рамках трех основных форм РКМ.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных форумах: международной конференции "Физика высоких энергий и квантовая теория поля"(QFTHEP) (Санкт-Петербург, 2013; Самара, 2015), конференции "Физика фундаментальных взаимодействий"(Москва МИФИ, 2012), международной конференции по математической физике и ее приложениям (Самара, 2012, 2014), сессии-конференции ОЯФ РАН (Дубна, 2016), международной конференции

"Кварки-2016"(Санкт-Петербург, 2016), а также на регулярных научных семинарах в Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 15 работ, в том числе: в журналах из списка ВАК - 6, в журналах, не входящих в список ВАК - 4, в трудах конференций -5.

Личный вклад автора является определяющим при получении результатов, составивших основу диссертации. В частности, автором сформулирована методика построения матричного элемента электрослабого тока перехода недиагонального по полному угловому моменту, показана эквивалентность трех основных форм РКМ на примере расчета пионного формфактора, проведены все аналитические и численные расчеты.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 187 наименований, 2 приложений, 4 таблиц. Она содержит 12 рисунков. Общий объем диссертации составляет 123 страницы.

Содержание работы

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

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассматриваются различные релятивистские методы описания составных двухчастичных систем. Особое внимание уделяется описанию положений РКМ, которая используется в настоящей диссертационной работе.

Первый параграф посвящен краткому изложению методов релятивистского описания составных систем. В данном параграфе рассмотрены подходы, основанные на методах квантовой теории поля, а также некоторые феноменологические модели с фиксированным числом частиц. Выявлены характерные особенности данных подходов.

Во втором параграфе проведено описание алгебры группы Пуанкаре. Приведена классификация группы Пуанкаре относительно операций отражения пространства и времени. Рассматривается алгебра собственной ортохронной группы Пуанкаре, в том числе структура универсальной накрывающей группы специальных линейных 2×2 матриц - $SL(2, C)$.

В третьем параграфе рассматриваются основные формы РКМ: мгновенная форма, точечная форма, динамика на световом фронте. Подробно описываются особенности включения взаимодействия в генераторы группы Пуанкаре в зависимости от выбора формы РКМ. Кратко описываются результаты расчетов электрослабых свойств составных систем в основных формах РКМ.

Четвертый параграф посвящен описанию типов базисных векторов состояний в гильбертовом пространстве состояний двухчастичной системы. Подробно рассматривается структура канонического базиса одночастичной и двухчастичной систем в рамках мгновенной формы РКМ. Приведено описание моментного базиса двухчастичной системы с явно отделенным движением центра масс (СЦИ), который используется в последующих главах диссертации.

В пятом параграфе рассматривается методика построения матричного элемента электрослабого тока, диагонального по полному угловому моменту, в рамках мгновенной формы РКМ. Узловым моментом этого формализма является построение матричного элемента тока релятивистски ковариантным образом с помощью общего метода параметризации матричных элементов локальных операторов.

Вторая глава посвящена развитию метода построения матричных элементов токов, недиагональных по полному угловому моменту, в рамках мгновенной формы РКМ, а также вычислению с использованием этого метода электрослабых характеристик ρ -мезона.

В первом параграфе развивается процедура параметризации матричных элементов токов недиагональных по полному угловому моменту. Параметризация производится в брейтовской системе отсчета (БС), результат параметризации преобразуется затем к лабораторной системе (ЛС). Построение матричного элемента тока проводится отдельно для его нулевой и трехмерной компоненты. Описание нулевой компоненты тока

проводится в терминах тензорного оператора нулевого ранга, а трехмерной компоненты - в терминах тензорного оператора первого ранга. Матричный элемент тока выражается через конечное число релятивистски-инвариантных функций - формфакторов.

В качестве иллюстрации развитой методики недиагональной параметризации матричного элемента тока в рамках мгновенной формы РКМ во втором параграфе получено аналитическое выражение для константы лептонного распада ρ -мезона. Показано, что аналитическое выражение для константы f_ρ совпадает с выражениями, полученными в рамках точечной формы динамики и динамики на световом фронте.

В третьем параграфе произведены расчеты зарядового радиуса ρ -мезона. Параметры конститuentных кварков фиксируются из пионных расчетов, а параметры волновых функций - из экспериментального значения константы лептонного распада ρ -мезона: $f_\rho^{exp} = 152 \pm 8 \text{ MeV}$. Показано, что при данной фиксации параметров модели значение среднеквадратичного радиуса ρ -мезона удовлетворяет равенству:

$$\langle r_\rho^2 \rangle - \langle r_\pi^2 \rangle = 0.11 \pm 0.06 \text{ fm}^2 . \quad (1)$$

Равенство (1) получено, исходя из гипотезы Ву и Янга относительно вида сечения упругого адрон-протонного рассеяния.

Следствием этой гипотезы является равенство зарядового радиуса и т.н. среднеквадратичного радиуса сильного взаимодействия адрона, который выражается через наклон сечений адрон-протонного, протон-протонного и протон-антипротонного рассеяния (см. Рис.1).

Третья глава посвящена описанию радиационного распада $\rho \rightarrow \pi\gamma^*$ средствами развитой во второй главе диссертации методики недиагональной параметризации матричного элемента электрослабого тока.

Первый параграф посвящен анализу зависимости электрослабых характеристик π - и ρ -мезона от параметров составной кварковой модели. Проведены численные расчеты электромагнитных формфакторов ρ -мезона для разных волновых функций и масс конститuentных кварков. Показано, что зависимость формфакторов от массы конститuentных кварков является более сильной, чем зависимость от выбора волновой функции. Графики расчетов электромагнитных формфакторов ρ -мезона в различных

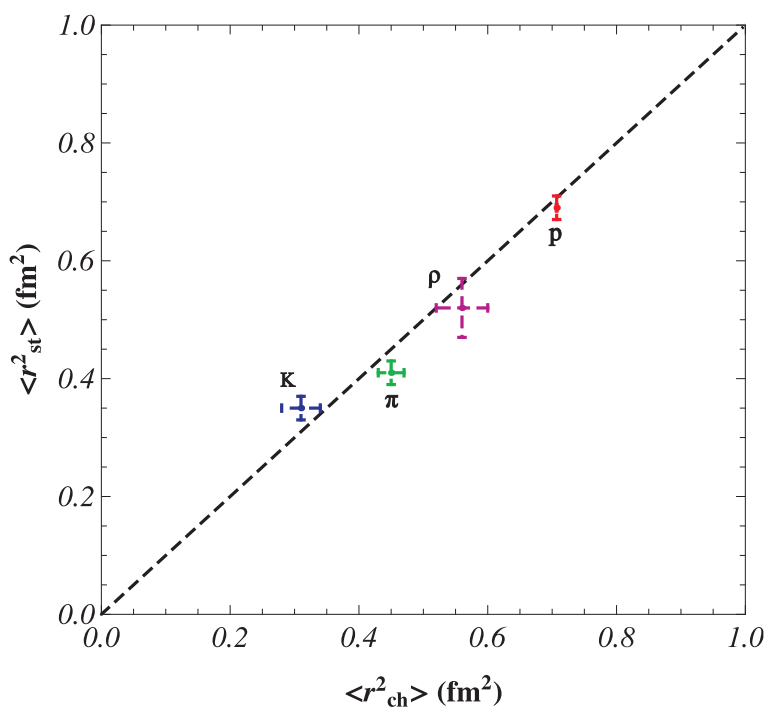


Рис. 1: Экспериментальные соотношения между сильными адронными $\langle r_{st}^2 \rangle$ и зарядовыми радиусами $\langle r_{ch}^2 \rangle$ пиона (π), каона (K), протона (p). Результаты для среднеквадратичного радиуса ρ -мезона получены в диссертации.

моделях кварк-антикваркового взаимодействия при фиксированной массе конститuentного кварка собираются в группы (см. Рис. 2).

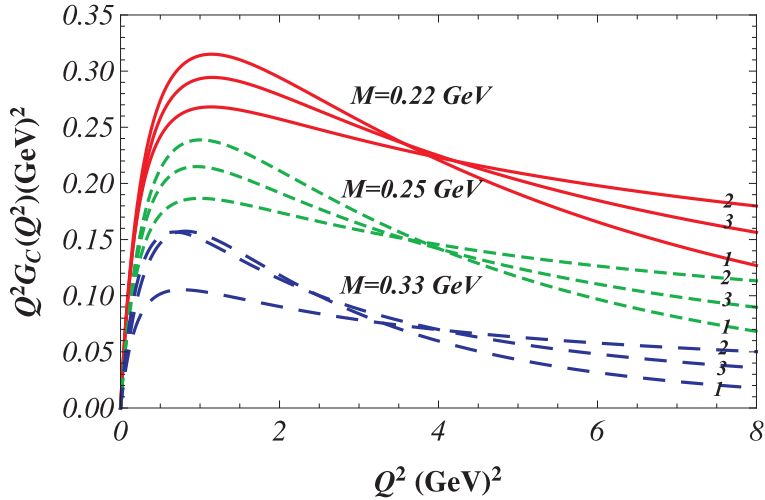


Рис. 2: Результаты расчета электрического формфактора ρ -мезона для различных масс конститuentных кварков и волновых функций. 1 - волновая функция основного состояния гармонического осциллятора; 2 - волновая функция степенного типа при $n = 2$; 3 - волновая функция степенного типа при $n = 3$.

Как видно из рисунка, экспериментальное измерение формфактора ρ -мезона, в принципе, может дать информацию о величине массы конститuentных u - и d -кварков.

Второй параграф содержит построение электрослабого тока перехода между состояниями свободной двухчастичной системы с квантовыми числами π - и ρ -мезонов. Получены аналитические выражения для т.н. свободных формфакторов или приведенных матричных элементов тока перехода с изменением полного углового момента в двухчастичной системе без взаимодействия.

В третьем параграфе проведена процедура недиагональной параметризации матричного элемента тока составной системы со взаимодействием. В рамках МИП получены аналитические выражения для формфакторов составной системы:

$$G_{01}^{01}(Q^2) = \int \int d\sqrt{s}d\sqrt{s'}g_{01}^{01}(s, Q^2, s')\varphi(s)\varphi_{S'}^{J'}(s'), \quad (2)$$

$$G_{01}^{111}(Q^2) = \int \int d\sqrt{s}d\sqrt{s'}g_{01}^{111}(s, Q^2, s')\varphi(s)\varphi_{S'}^{J'}(s'), \quad (3)$$

$g_{01}^{01}(s, Q^2, s')$, $g_{01}^{111}(s, Q^2, s')$ - свободные электромагнитные формфакторы двухчастичной системы, явный вид которых не представлен в автореферате, в силу их громоздкости; Q^2 - квадрат переданного импульса, s, s' - инвариантные массы свободной двухчастичной системы в начальном и конечном состоянии; $\varphi(s), \varphi_{S'}^{J'}(s')$ - волновые функции в смысле РКМ для пиона и ρ -мезона, соответственно.

Получена формула, описывающая связь общепринятого формфактора перехода, входящего в сечение процесса $\rho \rightarrow \pi\gamma^*$ с формфактором (3):

$$F_{\pi\rho}(Q^2) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{G_{01}^{111}(Q^2)}{q \left(\sqrt{M_\pi^2 + q^2} + \sqrt{M_\rho^2 + q^2} \right)}, \quad (4)$$

где

$$q = \sqrt{\lambda(M_\pi^2, M_\rho^2, Q^2)/[8(M_\pi^2 + M_\rho^2) + 4Q^2]},$$

$\lambda(a, b, c) = a^2 + b^2 + c^2 - 2(ab + ac + bc)$, M_π и M_ρ - массы π - и ρ -мезонов, соответственно.

В четвертом параграфе производится расчет переходного формфактора $F_{\pi\rho}(Q^2)$ и соответствующего магнитного момента перехода $\mu_{\pi\rho} = F_{\pi\rho}(0)$. Масса конституентного кварка фиксируется из пионных расчетов, параметр волновых функций - из требования описания среднеквадратичных радиусов π - и ρ - мезонов. Формфактор кварка

был выбран в виде:

$$f_q(Q^2) = \frac{1}{1 + \langle r_q^2 \rangle Q^2/6}, \quad (5)$$

$\langle r_q^2 \rangle$ -среднеквадратичный радиус конститuentного кварка.

Выбор формфактора (5) был продиктован необходимостью сравнения с результатами других работ. Результаты расчета магнитного момента перехода имеют хорошее согласие с экспериментом и качественно согласуются с результатами других теоретических подходов.

Показано, что результаты вычислений переходного формфактора в развитой в диссертации формулировке составной кварковой модели при малых переданных импульсах близки к результатам модели векторной мезонной доминантности, т.о., фактически, выполняется принцип соответствия.

При больших переданных импульсах видно, что в случае использования формфактора конститuentного кварка (5) произведение $Q^4 F_{\pi\rho}(Q^2)$ близко к постоянной величине (см. Рис. 3).

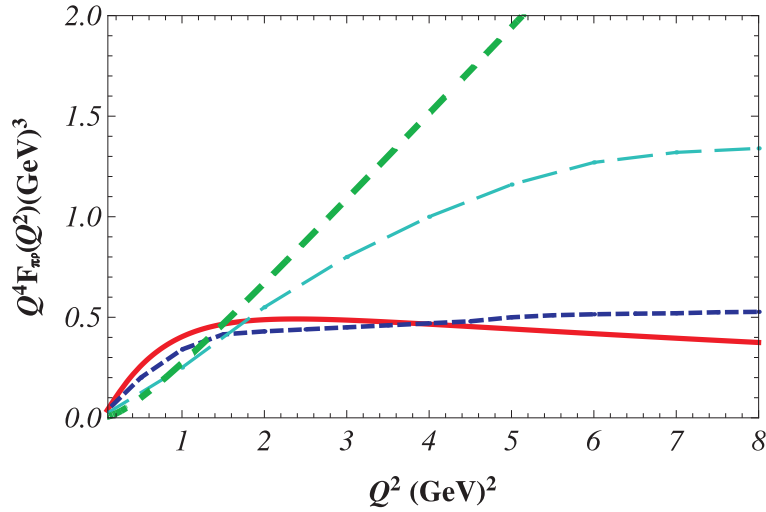


Рис. 3: Результаты расчета переходного формфактора в разных подходах. Сплошная линия - результаты нашего расчета; короткий штрих - расчеты в составной кварковой модели в динамике на световом фронте; средний штрих - результаты расчета в модели векторной мезонной доминантности; длинный штрих - результаты расчета в квазипотенциальном подходе. Все расчеты в составной кварковой модели выполнены с волновой функцией основного состояния гармонического осциллятора.

Если вместо (5) использовать формфактор кварка логарифмического типа, то результаты расчетов величины $Q^2 F_{\pi\rho}(Q^2)$ с точностью до логарифмической поправки выходят на константу, что совпадает с предсказаниями КХД.

В четвертой главе показана эквивалентность расчетов электромагнитных формфакторов составных кварковых систем для основных форм РКМ.

В качестве первого шага в первом параграфе проведена параметризация матричного элемента тока простой модельной системы двух бесспиновых частиц в S - состоянии относительного движения в мгновенной, точечной формах динамики и динамики на световом фронте. Анализ выражений показывает полную эквивалентность формул, полученных в разных динамиках.

С использованием МИП во втором параграфе получено аналитическое выражение для зарядового формфактора системы двух бесспиновых частиц со взаимодействием в трех основных формах РКМ. Показано, что результаты расчета формфактора не зависят от выбора формы РКМ.

Показана независимость формфакторов от выбора системы отсчета. Необходимость анализа такого рода связана с выявленным в ряде работ несопадением расчетов электромагнитных формфакторов в ЛС и БС в рамках мгновенной формы РКМ. Для простоты и наглядности проведено вычисление зарядового формфактора системы двух бесспиновых частиц в БС и ЛС с использованием МИП. Анализ полученных результатов демонстрирует полную эквивалентность формул для формфактора в разных системах отсчета. Таким образом, получено, что несопадение результатов расчета формфактора в разных системах отсчета связано с использованием ИП, которое приводит к разным результатам в ЛС и в БС, тогда как используемое в диссертационной работе МИП дает в разных системах отсчета одинаковые результаты.

В третьем параграфе проведено обобщение процедуры канонической параметризации матричных элементов токов в мгновенной форме динамики на другие основные формы РКМ при расчете электромагнитного формфактора пиона. Методика построения матричного элемента тока осуществляется в единых обозначениях для трех основных форм одновременно. С использованием МИП получено аналитическое выражение для электромагнитного формфактора пиона:

$$F_{\pi}(Q^2) = \int \int d\sqrt{s}d\sqrt{s'}G_0(s, Q^2, s')\varphi(s)\varphi(s'), \quad (6)$$

где $G_0(s, Q^2, s')$ - формфактор свободной двухчастичной системы с

квантовыми числами пиона.

Выражение (6) полностью совпадает для разных форм РКМ.

Расчет волновых функций, входящих в аналитическое выражение для формфактора (6), осуществляется в четвертом параграфе путем решения вариационной задачи на собственные значения для оператора массы:

$$\hat{M}_I \psi = M_c \psi, \quad \hat{M}_I = \hat{M}_0 + \hat{V}, \quad (7)$$

\hat{M}_0 - оператор массы свободной двухчастичной системы, \hat{V} - оператор взаимодействия, ψ - волновая функция в смысле РКМ.

Далее производится численный расчет электромагнитного формфактора и вычисление среднеквадратичного радиуса пиона. Результаты расчетов дают достаточно хорошее описание экспериментальных данных.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В **приложении 1** содержатся аналитические выражения для свободных двухчастичных формфакторов, используемых для описания радиационного распада $\rho \rightarrow \pi\gamma^*$.

В **приложении 2** приведены аналитические выражения для свободных двухчастичных электромагнитных формфакторов с квантовыми числами ρ -мезона.

ПУБЛИКАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в список ВАК:

1. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Построение оператора электромагнитного тока в разных формах Пуанкаре-инвариантной квантовой механики // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки.-2013.-вып.2(31).- С.243–249.
2. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Описание электромагнитной структуры пиона в различных формах Пуанкаре-инвариантной квантовой механики // Ядерная физика и инжиниринг.- 2013.-Т.4.-С.848-852.
3. Krutov A.F., Polezhaev R.G. The construction of the electromagnetic current operator for the process of decay of the rho-meson in the instant form of the Poincare-invariant quantum mechanics // Proceeding of Science- 2014.- V.67.-P.1–8.

4. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Описание радиационных распадов $V \rightarrow P\gamma^*$ в различных формах Пуанкаре-инвариантной квантовой механики // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки.-2015.-Т.19(2).-С.259–269.
5. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г., Троицкий В.Е. Описание радиационных распадов в рамках мгновенной формы релятивистской квантовой механики // Теоретическая и математическая физика.-2015.-Т.184(2).-С.290–306.
6. Krutov A.F., Polezhaev R.G., Troitsky V.E. Radius of the ρ meson determined from its decay constant // Physical Review D.- 2016.-V.93.-036007; arxiv:1602.00907[hep-ph].

Остальные публикации:

1. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Электромагнитный формфактор пиона в разных формах динамики // Теоретическая физика.-2011.-Т.12.-С.50–62.
2. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Построение оператора электромагнитного тока в брейтовской системе отсчета // Теоретическая физика. -2011.-Т.12.-С.63–68.
3. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Недиагональная параметризация матричного элемента электромагнитного тока в мгновенной форме Пуанкаре-инвариантной квантовой механики // Теоретическая физика.-2012.-Т.13.-С.77–82.
4. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Расчет переходного формфактора $F_{\rho \rightarrow \pi\gamma^*}(Q^2)$ в мгновенной форме Пуанкаре-инвариантной квантовой механики // Теоретическая физика.-2013.-Т.14.-С.19–33.
5. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Формфактор пиона // Третья международная конференция "Математическая физика и ее приложения".-2012.- С.177.
6. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Описание электромагнитной структуры пиона // Тезисы докладов международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий".-2012.-С.114-115.

7. Крутов А.Ф., Полежаев Р.Г. Описание радиационных распадов $V \rightarrow P\gamma^*$ в разных формах Пуанкаре-инвариантной квантовой механики // Четвертая международная конференция "Математическая физика и ее приложения".-2014.-С.210.
8. Krutov A.F., Polezhaev R.G., Troitsky V.E. Static electromagnetic moments and lepton decay constant of the ρ -meson in the instant form of relativistic quantum mechanics // arxiv:1512.07200[hep-ph].-2015.-P.1-9.
9. Krutov A.F., Polezhaev R.G., Troitsky V.E. Radiative decays $V \rightarrow P\gamma^*$ in the instant form of relativistic quantum mechanics // arxiv:1601.02678[hep-ph].-2016.-P.1-9.

Подписано в печать “_____” _____ 2016 г.

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

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

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

Отпечатано в типографии: "ПРАЙМ",
443079, г. Самара, Балтийский переулок, 12.