



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
“КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ”
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи

Нефедьев Алексей Владимирович

**ПОРОГОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ И
ЭКЗОТИЧЕСКИЕ АДРОНЫ
В НЕПЕРТУРБАТИВНОЙ КХД**

Специальность: 01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

2017

Работа выполнена в ФГБУ “ГНЦ РФ Институт Теоретической и
Экспериментальной Физики” НИЦ “Курчатовский институт”, г.Москва

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н. Николаев Николай Николаевич

главный научный сотрудник

ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН (г.Черноголовка)

д.ф.-м.н. Фаустов Рудольф Николаевич

главный научный сотрудник

Института образовательной информатики

ФИЦ ИУ РАН (г.Москва)

д.ф.-м.н. Эйдельман Семён Исаакович

главный научный сотрудник

ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (г.Новосибирск)

Ведущая организация:

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (г.Москва)

Защита состоится 14 марта 2017 г. в 11 часов на заседании диссертационного
совета Д.201.002.01 в конференц-зале ГНЦ РФ “Институт теоретической и экс-
периментальной физики” по адресу г.Москва, ул. Б. Черемушкинская, д. 25

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ и на сайте www.iter.ru

Автореферат разослан 10 февраля 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физ.-мат.наук

В. В. Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Основной задачей теории сильных взаимодействия является описание различных свойств адронов, в частности, их спектра масс и взаимодействий. Неабелев характер квантовой хромодинамики делает возможным существование адронных состояний, имеющих более сложную структуру, чем кварк-антикварковые мезоны и трёхкварковые барионы. К числу таких состояний можно отнести гибридные мезоны и барионы, глюболы, тетракварки, адронные молекулы и т.п., причём далеко не все из них описываются простыми кварковыми моделями. Описание и однозначное отождествление таких экзотических адронов является вызовом как для теоретиков, работающих в области феноменологии сильных взаимодействий, так и для специалистов по компьютерным расчётам на решётках, а также для экспериментаторов. Начиная с 2003 года, когда коллаборацией Belle, работающей на B -фабрике в Цукубе (Япония), было обнаружено чармонийподобное состояние $X(3872)$, количество экзотических состояний в спектре чармония и боттомония, не укладывающихся в стандартную схему потенциальных кварковых моделей, стремительно растёт, а вместе с ним растёт и количество вопросов и загадок, требующих разрешения. Планируемая светимость B -фабрики нового поколения Belle-II при энергии резонанса $\Upsilon(4S)$ примерно на два порядка превосходит параметры B -фабрик предыдущего поколения. Такой рост светимости даёт основания ожидать не только существенного улучшения статистики и, как результат, точности описания ранее

обнаруженных и измеренных состояний и реакций, но также обнаружения принципиально новых эффектов, ранее недоступных для изучения, в том числе и в области физики адронов. Другим важным источником информации о сильных взаимодействиях является Большой Адронный Коллайдер, расположенный в Европейской лаборатории CERN, а в будущем — эксперимент PANDA (часть программы FAIR) в институте GSI (Дармштадт, Германия).

Описание и объяснение уже имеющихся экспериментальных данных по экзотическим состояниям в спектре адронов, а также более точных данных, получение которых ожидается в будущих высокоточных экспериментах с высокой статистикой как для уже известных состояний, так и для новых, требуют построения и использования адекватных феноменологических подходов. Особое значение имеют подходы к описанию околопороговых состояний, поскольку, с одной стороны, количество уже обнаруженных таких состояний быстро растёт ввиду наличия большого числа порогов, а с другой стороны, именно околопороговые состояния обладают наиболее интересными свойствами, позволяющими рассчитывать на извлечение из них ценной информации о сильных взаимодействиях. Важно отметить, что описание экспериментальных данных для экзотических состояний требует построения реалистичных, однако при этом достаточно простых и наглядных параметризаций, призванных заменить “стандартное” распределение Брейта-Вигнера, а в ряде случаев и его расширение в виде распределения Флатте.

Другим важным источником информации об экзотических состояниях в спектре тяжёлых кварков является численный эксперимент, основанный на решёточных расчётах. Соотнесение результатов таких решёточных расчётов с теоретическими моделями и с экспериментальными данными также является важной задачей феноменологии сильных взаимодействий.

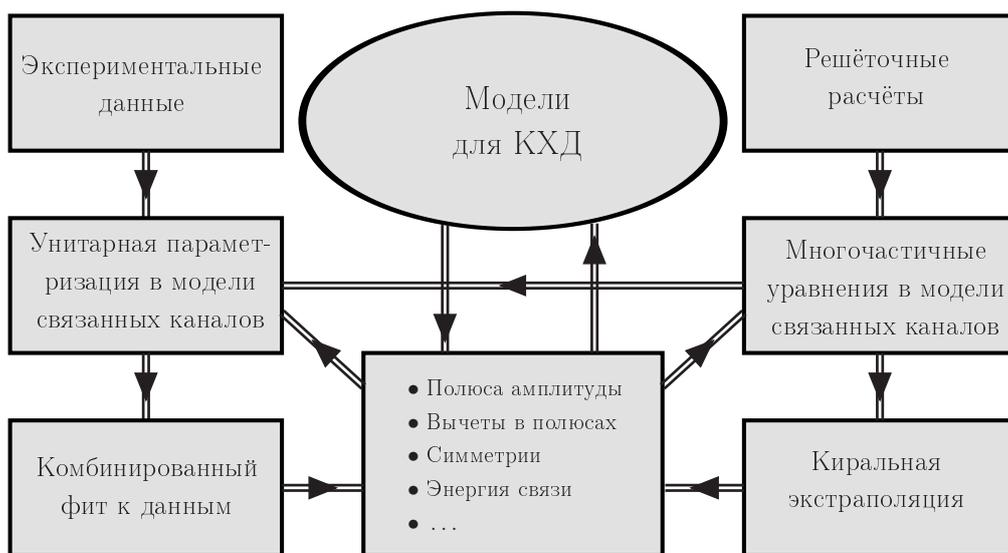


Рис. 1. Схематическое изображение взаимосвязи методов и подходов, предложенных в диссертации, а также их связи с экспериментом (реальным или численным) и теоретическими моделями для КХД — см. пояснения в тексте.

В диссертации предложены методы и подходы, призванные играть роль промежуточного звена между экспериментом (реальным или численным) и теоретическими моделями для КХД. На рис. 1 приведено схематическое изображение взаимосвязей между такими методами и подходами. Основой подхода является система уравнений связанных каналов с учётом произвольного числа упругих и неупругих каналов, а также затравочных полюсов (отвечающих кварковым состояниям). Построению такой системы уравнений посвящены первые три главы диссертации. В частности, в первой главе изучаются эффекты, возникающие в околопороговых резонансах за счёт взаимного влияния различных степеней свободы в них, а также подробно описывается используемый формализм. Во второй главе задача связанных каналов применительно к физике тяжёлых кварков рассматривается в наиболее общем виде. Полученная при этом система уравнений позволяет построить достаточно простую, но реалистиче-

скую параметризацию для одновременного описания экспериментальных данных для всех каналов реакций рождения и распада рассматриваемого околопорогового резонанса (или резонансов). Возможности предложенной параметризации демонстрируются на примере описания экспериментальных данных для околопороговых состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ в спектре боттомония.

Включению в рассмотрение трёхчастичных эффектов, как эффективно-му, так и полному — за счёт расширения базиса модели, посвящены третья и четвёртая главы диссертации. Обобщённый таким образом подход к околопороговым состояниям позволяет успешно описывать не только сами пороговые явления, но также вычленять трёхчастичную динамику в них, что особенно важно для понимания природы околопороговых явлений, в частности, природы удерживающих сил и взаимодействий в околопороговых резонансах. Кроме того, это позволяет строить киральные экстраполяции для экзотических адронов и, тем самым, интерпретировать результаты решёточных вычислений, выполненных при нефизически больших массах лёгких кварков — данному вопросу посвящена пятая глава диссертации.

Построенные фиты к экспериментальным данным и киральные экстраполяции для результатов решёточных расчётов позволяют извлекать такие параметры изучаемых резонансов, как положение полюсов амплитуды, значения вычетов в полюсах, энергия связи, наличие или, наоборот, нарушение той или иной симметрии и тому подобное. Данные вопросы подробно разбираются в соответствующих разделах диссертации. Важно отметить, что извлечённая таким образом информация может использоваться для уточнения или упрощения используемой системы уравнений связанных каналов, что должно приводить к повышению точности и надёжности описания данных, а также извлечения из них параметров околопороговых резонансов. Важно также, что полученная инфор-

мация может непосредственно использоваться при построении и тестировании моделей для КХД. И наоборот, при наличии модельных расчётов вычисленные величины (например, константы и формфакторы связи каналов, предсказанные симметрии и т.п.) могут использоваться в качестве входных параметров для предложенного в диссертации подхода. Таким образом, предлагаемый в диссертации метод исследования околопороговых явлений позволяет существенно продвинуться в описании и понимании природы и свойств околопороговых состояний.

Степень разработанности темы исследования

Основным источником информации об адронных состояниях, в том числе экзотических, является эксперимент. Первое из таких состояний — $X(3872)$ в спектре чармония, лежащее вблизи нейтрального порога $D\bar{D}$, — было обнаружено в эксперименте Belle в 2003 году [40], ознаменовав тем самым начало новой эры в физике тяжёлых кварков. За тринадцать лет, прошедших с момента обнаружения $X(3872)$, надёжно установлено более десятка новых экзотических состояний, содержащих пару очарованных кварков.

В 2011 году в эксперименте Belle были открыты состояния $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ [41]. Оба состояния заряженные, поэтому их минимальный кварковый состав экзотический: четырехкварковая комбинация b, \bar{b} и пары лёгких кварков. Масса $Z_b(10610)$ в пределах экспериментальной погрешности лежит вблизи порога $B\bar{B}^*$, масса $Z_b(10650)$ практически совпадает с порогом $B^*\bar{B}^*$, а их видимые ширины составляют приблизительно 10-20 МэВ.

Эти открытия стали возможны во многом благодаря большой интегральной светимости, набранной в экспериментах Belle и BABAR, где кварконий может рождаться посредством различных механизмов. Важную информацию о новых состояниях чармония удалось получить в экспериментах, работающих

при энергии e^+e^- аннигиляции в области порога открытого чарма (CLEOс и BESIII), в экспериментах на Тэватроне (CDF и D0), а в последние годы — в протон-протонных экспериментах на LHC (LHCб, CMS, Atlas). Экспериментальные исследования уже открытых состояний и поиск новых продолжают на протяжении последнего десятилетия, и их интенсивность растёт с каждым годом, новые эксперименты активно включаются в эти исследования.

Альтернативным источником информации о природе и свойствах адронов являются решёточные расчёты, выполняемые, исходя из первых принципов КХД. Несмотря на активное развитие этой области исследований и быстрый рост вычислительных мощностей, предсказание свойств экзотических состояний находится в достаточно зачаточном состоянии, хотя первые результаты уже начинают поступать [42–44]. Их теоретическое осмысление, детальное исследование неопределённостей, связанных с конечным объёмом и конечным шагом решётки, нефизически большими массами лёгких кварков, используемых в вычислениях, являются важными вопросами, требующими пристального внимания и изучения.

На протяжении всего времени экспериментального изучения экзотических адронных состояний предпринимаются попытки теоретического объяснения их свойств с использованием различных подходов. В наиболее консервативных из них предлагается пересмотреть влияние открывающихся порогов на параметры состояний кваркония, предсказанных потенциальными моделями. Однако большинство теоретиков признают, что необычные свойства новых кварконийподобных состояний невозможно объяснить, не допуская существования экзотических систем, отличных от привычных связанных состояний тяжёлых кварков. Основные модели, пытающиеся объяснить природу новых состояний, предполагают наличие молекулярных, тетракварковых, гибридных состояний,

глюболов и адрокваркония. В частности, для чармонийподобного состояния $X(3872)$ и для двух боттомонийподобных состояний $Z_b^{(\prime)}$ молекулярная гипотеза является уже общепринятой. Так, всю совокупность экспериментальных данных для $X(3872)$ удастся объяснить в предположении, что волновая функция последнего помимо кварковой компоненты $\bar{c}s$ содержит также молекулярную компоненту $D\bar{D}^*$. Аналогично, состояния Z_b являются, по-видимому, молекулами $B\bar{B}^*$ и $B^*\bar{B}^*$ [45, 46]. Альтернативной моделью являются компактные тетракварки, см., например, работы [47–50]. Микроскопические расчёты спектра тетракварков можно найти, например, в работах [51, 52]. Возможность описания заряженных состояний в спектре чармония, типа $Z^+(4430)$, перерасеянием D мезонов — продуктов распада векторных ψ мезонов — была предложена в работах [53, 54], а также проанализирована с точки зрения влияния треугольных сингулярностей соответствующей амплитуды (см., например, работу [55]) в работе [56]. В работах [57, 58] предложена модель адрочармония для описания свойств некоторых Y и Z состояний в спектре чармония. В работах [59–62] предложен микроскопический подход к описанию взаимодействий и формфакторов переходов между каналами в $X(3872)$ и в $Z_b^{(\prime)}$. В работе [63] основные свойства состояния $X(3872)$ описаны в рамках относительно простой модели связанных каналов. К сожалению, следует констатировать, что, ввиду огромного количества теоретических публикаций по теме экзотических адронов, упомянуть их все не представляется возможным даже кратко. Однако очевидно, что основным направлением теоретических исследований в мировой науке в области экзотических состояний в спектре тяжёлых кварков является выход за рамки наивных кварковых моделей и использование для описания новых состояний различных подходов, мотивированных квантовой хромодинамикой.

При этом необходимо признать существование “пропасти” между экспериментальными данными и предсказаниями теоретических моделей и подходов, а также решёточными расчётами. Суть проблемы кроется в невозможности построения модели, способной единообразно описать все околопороговые явления и экзотические состояния в спектре тяжёлых кварков, причём сделать это с помощью простых выражений, которые могут непосредственно использоваться в анализе экспериментальных данных. Неизбежный при этом вывод состоит в необходимости существования феноменологического подхода, занимающего промежуточное положение между теорией и экспериментом, совместимого со всеми требованиями унитарности и аналитичности и позволяющего использовать всю полноту информации, содержащейся в экспериментальных данных, для извлечения значений параметров, имеющих простую физическую интерпретацию и, следовательно, доступных для вычисления в рамках микроскопических теоретических подходов. Диссертация посвящена построению такого связующего феноменологического подхода.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертации является разработка методов и подходов к описанию пороговых явлений и экзотических адронных состояний в спектре тяжёлых кварков, позволяющих извлекать необходимую для теоретического анализа информацию о природе и свойствах таких состояний из экспериментальных данных, а также из результатов решёточных расчётов.

Научная новизна

Диссертация посвящена исследованию широкого круга вопросов, связанных с физикой экзотических адронов.

В первой главе диссертации впервые детально прослежено и описано

взаимное влияние кварковых и адронных степеней свободы в околопороговом резонансе, в том числе в многоканальном случае. Явно продемонстрировано, как учёт такого взаимного влияния может приводить к форме линии резонанса нетривиальной формы. Далее аргументировано, что описание экспериментальных данных полученными формулами может позволить извлекать информацию о природе околопорогового резонанса и об удерживающих силах в нём. Результаты, изложенные в первой главе, опубликованы в работах [1–3].

Во второй главе диссертации предложена параметризация формы линии околопороговых резонансов, непertурбативным образом включающая все возможные типы переходов между связанными каналами. Важным свойством полученной параметризации являются её явные унитарность и аналитичность, но при этом достаточная простота, позволяющая её непосредственное использование для анализа экспериментальных данных. Таким образом, в диссертации впервые представлен феноменологический инструмент, позволяющий преодолеть “пропасть” между моделями сильных взаимодействий и экспериментом: описание экспериментальных данных в терминах параметров, допускающих ясную физическую интерпретацию, даёт возможность построения и проверки различных модельных подходов без необходимости непосредственного описания эксперимента. Результаты, изложенные во второй главе, опубликованы в работах [4–11].

В третьей главе диссертации исследована возможность эффективного включения в рассмотрение трёхчастичной динамики в околопороговых резонансах, в частности, идентифицирован безразмерный параметр, определяющий возможность такого эффективного рассмотрения без явного расширения базиса системы связанных каналов на трёхчастичные состояния. Далее детально рассмотрена $D_1\bar{D}^*$ система, в которой такой эффективный подход к трёхча-

стичной динамике невозможен, поскольку точный учёт трёхчастичной унитарности является критически важным для описания свойств системы и во избежание ложных выводов, к которым может приводить нарушение трёхчастичной унитарности. Результаты, изложенные в третьей главе, опубликованы в работах [12–22].

В четвёртой главе диссертации проведено детальное изучение свойств одного из наиболее характерных представителей семейства экзотических околопороговых состояний — чармонийподобного состояния $X(3872)$. В частности, из совместного анализа экспериментальных данных по различным модам распада $X(3872)$ сделан вывод о том, что X является слабо связанным состоянием с достаточно большой (порядка 50%) примесью истинного $\bar{c}s$ чармония. Далее сделаны оценки вероятности прямого рождения $X(3872)$ в e^+e^- соударениях, а также проделаны вычисления вероятностей радиационных распадов $X(3872)$ в рамках калибровочно инвариантного теоретико-полевого подхода, и продемонстрирована совместимость существующих на данный момент экспериментальных данных по таким распадам с молекулярной моделью X . Разработан метод непертурбативного учёта однопионного обмена между D и D^* мезонами в $X(3872)$ с помощью системы трёхчастичных уравнений типа уравнения Фаддеева. Из решения полученной системы уравнений сделан ряд выводов относительно роли однопионного обмена для формирования и природы $X(3872)$. В частности, показано, что однопионный обмен является недостаточно удерживающим для формирования $X(3872)$ как связанного состояния. Далее, на основе выведенной системы трёхчастичных уравнений сформулирован теоретико-полевого подход к описанию $X(3872)$ в рамках системы связанных каналов с непертурбативным учётом как короткодействующих сил, так и дальнедействующей части однопионного обмена $X(3872)$. Получены количественные

оценки влияния динамических пионов на форму линии резонанса и, в частности, продемонстрирована важность явного учёта пионной динамики в $X(3872)$. Результаты, изложенные в четвёртой главе, опубликованы в работах [23–37].

В пятой главе диссертации предложен метод киральной экстраполяции энергии связи $X(3872)$ по массе пиона с целью интерпретации решёточных данных, полученных при нефизически большой массе пиона (массе лёгкого кварка), а также извлечения из них информации о свойствах изучаемого околопорогового резонанса в физической точке по массе пиона. Результаты, изложенные в пятой главе, опубликованы в работах [38, 39].

Таким образом, в диссертации впервые предложен комплексный подход к исследованию природы околопороговых состояний в спектре тяжёлых кварков на основании всех доступных источников информации о них. В частности, метод включает в себя анализ экспериментальных данных с помощью предложенной оригинальной параметризации, извлечение из них параметров системы, допускающих ясную физическую интерпретацию, а также их последующее использование в качестве входных параметров для теоретического описания свойств системы недоступных для экспериментального исследования, например, построения различных киральных экстраполяций. Метод допускает и обратную последовательность действий, при которой любая дополнительная информация об изучаемой системе, такая как дополнительные симметрии или данные, извлечённые из решёточных расчётов, может быть непосредственно включена в параметризацию формы линии резонанса с последующим анализом экспериментальных данных с её помощью — см. схему на рис. 1.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты, изложенные в диссертации, имеют как чисто теоретическое, так и прикладное значение. В частности, сделанные оценки вероятностей рож-

дения и распадов околопороговых состояний могут использоваться при планировании будущих экспериментов, а также при интерпретации их результатов. Предложенные в диссертации методы призваны облегчить обработку и анализ экспериментальных данных, сделать возможным извлечение из них наиболее полной информации об изучаемых околопороговых состояниях, а также непосредственное использование извлечённой информации в теоретических построениях. Развитые подходы позволяют существенно облегчить непосредственную имплементацию в анализе данных различных теоретических условий и ограничений, например, требований симметрий, информации, извлечённой из решёточных или модельных расчётов, и т.п. Также в диссертации предложен теоретико-полевой подход к описанию свойств состояния чармония $X(3872)$. Одним из приложений метода, описанным в диссертации, является построение киральной экстраполяции энергии связи X по массе лёгкого кварка, который открывает возможность интерпретации соответствующих решёточных данных и извлечения из них информации о природе, удерживающих силах и других свойствах $X(3872)$. Развитый метод допускает естественное обобщение на другие околопороговые состояния в спектре тяжёлых кварков.

Методология и методы исследования

Для получения изложенных в диссертации результатов использовались следующие основные методы и подходы:

- Модель связанных каналов.
- Уравнения Липпманна-Швингера.
- Трёхчастичные уравнения типа уравнений Фаддева.
- Подход С. Вайнберга к анализу природы околопороговых состояний.
- Различные параметризации формы линии резонансов, в том числе околопороговых: параметризация Брейта-Вигнера, параметризация Флатте, оригинальная

параметризация, предложенная в данной диссертации.

- Киральная теория возмущений и другие эффективные теории поля.
- Оригинальная методика построения киральных экстраполяций для околопорогового состояния в спектре тяжёлых кварков.

Положения, выносимые на защиту:

- Построена согласующаяся с требованиями унитарности и аналитичности феноменологическая параметризация для описания формы линии околопороговых резонансов в спектре тяжёлых кварков.
- С помощью построенной параметризации проведён совместный анализ экспериментальных данных для различных мод рождения и распада околопорогового состояния $X(3872)$ в спектре чармония, а также околопороговых состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ в спектре боттомония, позволивший сделать вывод об их природе и описать форму их линии в каналах распада с открытым и скрытым ароматом.
- Построен самосогласованный теоретико-полевой подход к описанию чармонийподобного состояния $X(3872)$ в рамках системы связанных каналов с непertурбативным учётом как короткодействующих сил, так и однопионного обмена. Продемонстрирована важная роль учёта динамических пионов. Предложенный подход допускает естественное обобщение на другие околопороговые состояния в спектре тяжёлых кварков.
- Получена киральная экстраполяция энергии связи чармонийподобного состояния $X(3872)$ по массе пиона, позволяющая связать физический предел и область больших масс пионов, используемых в решёточных расчётах.

- Сделана оценка вероятности прямого рождения $X(3872)$ в e^+e^- соударениях. Полученная оценка указывает на принципиальную возможность наблюдения изучаемого процесса на уже работающих ускорителях, в частности, в эксперименте BESIII.
- В рамках явно калибровочно инвариантного подхода получены оценки вероятностей радиационных распадов $X(3872)$ в молекулярной модели. Продемонстрировано согласие полученных оценок с экспериментально измеренными значениями.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на теоретических семинарах ИТЭФ, в других научных центрах, сессиях-конференциях секции отделения ядерной физики РАН, школе физики ИТЭФ, а также на различных международных конференциях, в частности, на “12th International Conference on Hadron Spectroscopy”, 2007; “Conference on Quark Confinement and the Hadron Spectrum (Confinement)”, 2008, 2010, 2016; “447th Wilhelm and Else Heraeus Seminar: Charmed Exotics”, 2009; “International Workshop on Heavy Quarkonium”, 2011; “2d SuperB Collaboration Meeting”, 2011; “Bethe Forum: Exotic Hadrons”, 2012; “New Hadrons”, 2014; “International Workshop on Exotic Hadron”, 2015; “The International Conference on Particle Physics and Astrophysics”, 2015.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в работах [1–39], из них 26 статей в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, 5 статей в сборниках трудов конференций, а также 8 тезисов докладов.

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключения, 4 приложений и библиографии. Общий объем диссертации 228 страниц, включая 56 рисунков и 11 таблиц. Библиография включает 265 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации подробно изучается вопрос о форме линии окологорогового резонанса в спектре тяжёлых кварков с учётом взаимного влияния кварковых и адронных степеней свободы, в том числе в многоканальном случае.

Одним из наиболее успешных подходов к описанию спектра масс и свойств адронных состояний в КХД являются разнообразные кварковые модели, причём для описания низколежащих кваркониев, состоящих из тяжёлых кварков, часто достаточно ограничиться нерелятивистскими моделями. Наивно можно было бы ожидать, что с повышением энергии необходимо лишь релятивизовать (по крайней мере, перейти к релятивистской кинематике) соответствующую

кварковую модель, которая в результате будет адекватно описывать высоко-возбуждённые состояния в спектре, хотя, возможно, и с несколько меньшей точностью. В реальности, однако, теория демонстрирует хорошее согласие с экспериментом лишь в области низколежащих состояний, тогда как для состояний, лежащих выше порога рождения открытого аромата, согласия между предсказаниями кварковых моделей и экспериментом нет. Неизбежный вывод состоит в том, что понимание и описание возбуждённых состояний в спектре чармония и боттомония, лежащих выше порога открытого аромата, возможно только при учёте влияния порогов. При этом необходимо построение и использование модельно независимых методов и подходов, учитывающих одновременно как кварковые, так и адронные степени свободы в изучаемых резонансах. В первой главе диссертации развивается подход к описанию формы линии околопорогового резонанса, основанный на модели связанных каналов.

В частности, для случая одного двухчастичного адронного канала M_1M_2 рассмотрена задача связанных каналов с двухкомпонентной волновой функцией, одна из компонент которой описывает “элементарное” (например, кварковое) состояние, а вторая — пару мезонов M_1 и M_2 . Построенная модель позволяет описать форму линии околопорогового резонанса в канале M_1M_2 . При этом результирующее распределение имеет смысл обобщения распределения Флатте [64] на случай взаимного влияния полюсов матрицы рассеяния, расположенных в околопороговой области и образовавшихся за счёт разной динамики. Наиболее нетривиальная ситуация (а, следовательно, и наиболее сложная форма линии резонанса) имеет место, если затравочные полюса, отвечающие как кварковой динамике, так и молекулярной динамике, по случайным причинам сосуществуют в околопороговой области, и при этом связь кваркового канала с мезонным не слишком сильная. Характерным признаком того, что имеет

место такая тонкая подстройка параметров теории, может являться наличие в околопороговой области нуля амплитуды упругого рассеяния, нарушающего обычное разложение эффективного радиуса.

Система связанных каналов с расширенным базисом от одного адронного канала до их произвольного количества N_e может рассматриваться в рамках того же формализма, что и одноканальный случай, причём в выражения для компонент матрицы рассеяния дополнительно входят попарные произведения импульсов, отвечающих разным каналам. Аналогично одноканальному случаю, в данной главе диссертации проведён детальный анализ всех возможных случаев соотношения параметров модели, и приведены соответствующие графики для формы линии околопорогового резонанса в многоканальной задаче.

Вторая глава диссертации посвящена построению модельно независимой феноменологической параметризации для описания формы линии околопороговых резонансов в присутствии множественных упругих и неупругих каналов, а также при наличии “затравочных” полюсов (“элементарных” состояний), описывающих близлежащие компактные кварковые образования, например, истинные кварконии или тетракварки. Рассматривается система, содержащая тяжёлую пару $\bar{Q}Q$ и распадающаяся по упругим каналам с открытым ароматом вида $(\bar{q}Q)(\bar{Q}q)$, а также по неупругим каналам со скрытым ароматом вида $(\bar{Q}Q)(\bar{q}q)$. Количество упругих каналов N_e , количество неупругих каналов N_{in} и количество затравочных полюсов N_p не фиксированы и могут меняться в зависимости от конкретной рассматриваемой физической системы. Характерными примерами систем, описываемых такой моделью, являются чармонийподобное состояние $X(3872)$ [40] или боттомонийподобные состояния $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ [41]. В первом случае упругими каналами распада являются каналы $D\bar{D}^*$ (с нейтральными и заряженными D мезонами), а неупругими

— $\rho J/\psi$ и $\omega J/\psi$. Кварковая компонента волновой функции резонанса может быть отождествлена с радиально возбуждённым P -волновым $\bar{c}s$ чармонием с квантовыми 2^3P_1 . Во втором случае упругие каналы есть $B^{(*)}\bar{B}^*$, а неупругие — $\pi\Upsilon(nS)/\pi h_b(mP)$ ($n = 1, 2, 3, m = 1, 2$). Поскольку состояния $Z_b^{(i)}$ содержат пару $\bar{b}b$, но при этом являются заряженными, то их минимальный состав является четырёхкварковым. Таким образом, в качестве компактной компоненты волновых функций состояний $Z_b^{(i)}$ следует рассматривать тетракварк, однако наиболее простым начальным предположением является отсутствие в волновой функции такой компоненты.

Основными преимуществами предлагаемой параметризации является возможность одновременного описания всех каналов реакции, а также её явная унитарность, достигаемая за счёт использования уравнений Липпмана-Швингера для системы связанных каналов. Ключевыми элементами модели являются прямое взаимодействие в упругих и неупругих каналах, формфакторы перехода между упругими и неупругими каналами, а также формфакторы перехода между кварковыми состояниями и остальными каналами. Если модель включает в себя все возможные каналы реакции, то унитарность и T -инвариантность приводят к требованию вещественности и симметрии потенциала взаимодействия. В этом случае все вершины и формфакторы переходов являются вещественными функциями, а источниками мнимостей могут быть только петлевые интегралы в каналах, пороги которых лежат ниже рассматриваемой энергии. Введение дополнительной неупругости, эффективно описывающей неучтённые каналы, возможно, но приводит к нарушению унитарности. Данный аргумент можно обратить: если для описания экспериментальных данных часть параметров должна приобрести мнимые части, то это свидетельствует о неполноте модели и о необходимости её расширения. В частности, это может свидетельство-

вать о существовании дополнительных каналов реакции, ещё не обнаруженных экспериментально.

При использовании сепарабельной формы формфакторов переходов между упругими и неупругими каналами задача допускает точное аналитическое решение, однако полученные при этом выражения весьма громоздки и поэтому малопригодны для анализа экспериментальных данных. В частности, процесс фитирования данных с использованием полученного решения требует многократного обращения матриц размером $(N_e + N_{in} + N_p) \times (N_e + N_{in} + N_p)$, причём количество неупругих каналов N_{in} может быть весьма велико. Дополнительным неудобством полного решения является необходимость начинать всю процедуру с самого начала для включения дополнительных неупругих каналов. Между тем, есть основания пренебрегать прямым взаимодействием между неупругими каналами. Так, для неупругих каналов, содержащих тяжёлые кварконии и пионы, такое взаимодействие подавлено в силу отсутствия в тяжёлых кваркониях лёгких валентных кварков и, следовательно, с отсутствием взаимодействия пионов с такими тяжёлыми кваркониями в лидирующем порядке низкоэнергетического разложения. Характерным примером такой ситуации являются прямые переходы между каналами $\pi \Upsilon(nS)$ и $\pi h_b(mP)$ в спектре боттомония. Дополнительным подтверждением такого подавления являются решёточные данные по длинам рассеяния в системах $\pi J/\psi$ и $\pi \eta_c$, которые принимают крайне малые, совместимые с нулём, значения [65]. Аналогично, в спектре чармония прямые переходы между каналами $\rho J/\psi$ и $\omega J/\psi$ в распадах состояния $X(3872)$ происходят с нарушением изоспина и, следовательно, сильно подавлены.

После пренебрежения прямыми переходами между неупругими каналами система уравнений Липпмана-Швингера допускает существенное упрощение. В частности, неупругие каналы входят в полученные выражения аддитивно,

поэтому добавление новых неупругих каналов сводится лишь к добавлению новых слагаемых в соответствующие суммы. Далее, воспользовавшись методом распутывания кварковых и адронных степеней свободы, разработанным в первой главе, можно свести задачу к матрицам малого размера — $N_e \times N_e$ и $N_p \times N_p$, т.е. достичь полного распутывания всех каналов. Поскольку на практике количество упругих каналов обычно не превышает двух, и количество полюсных членов также естественно ожидать на уровне от нуля до двух, то задача обращения соответствующих матриц становится тривиальной. Более того, полная задача сводится теперь к решению уравнения Липпмана-Швингера для упругой t -матрицы с эффективным потенциалом, включающим как прямое взаимодействие, так и перерассеяния через другие упругие каналы, неупругие каналы и через “элементарные” состояния. Решение для остальных компонент t -матрицы строится из упругой t -матрицы чисто алгебраически. Данный подход может рассматриваться в качестве обобщения двухпотенциального формализма [66, 67]. Построенные таким образом решения для компонент t -матрицы могут использоваться для определения амплитуд и сечений различных реакций в изучаемой системе.

Вблизи порога достаточно ограничиться лишь главной зависимостью форм-факторов от импульсов, отбросив поправки по обратному радиусу действия сил, так что в качестве параметров модели используются величины, имеющие простую физическую интерпретацию констант связи каналов. В результате построена совместимая с требованиями унитарности и аналитичности параметризация, которая может использоваться для описания экспериментальных данных для формы линии околопороговых резонансов в спектре тяжёлых кварков. Извлечённые из фита к экспериментальным данным параметры могут затем вычисляться в различных моделях или на решётке, так что предлагаемая

параметризация служит связующим промежуточным звеном между обработкой экспериментальных данных и вычислениями из первых принципов или в рамках моделей.

Возможности предложенной параметризации продемонстрированы на примере совместного описания данных для состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ в спектре боттомония. Существующие экспериментальные данные исчерпываются 7 каналами распада состояний Z_b :

$$\begin{aligned}
 \Upsilon(5S) &\rightarrow \pi Z_b^{(\prime)} \rightarrow \pi B^{(*)} \bar{B}^*, \\
 \Upsilon(5S) &\rightarrow \pi Z_b^{(\prime)} \rightarrow \pi\pi\Upsilon(nS), \quad n = 1, 2, 3 \\
 \Upsilon(5S) &\rightarrow \pi Z_b^{(\prime)} \rightarrow \pi\pi h_b(mP), \quad m = 1, 2.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Число параметров можно уменьшить, наложив требования симметрии спина тяжёлого кварка. Действительно, поскольку масса b -кварка достаточно велика ($m_b \gg \Lambda_{\text{QCD}}$), то спин тяжёлого кварка очень слабо влияет на динамику системы, что позволяет записать явный вид спиновых волновых функций состояний $Z_b^{(\prime)}$ [45] и, таким образом, установить соотношения, которым должны удовлетворять константы связи каналов в данном пределе. В результате фит содержит всего 14 параметров, лишь 7 из которых влияют на форму кривых (параметры прямого взаимодействия в упругих каналах γ_s и γ_t , а также 5 независимых констант связи каналов), а остальные 7 определяют общую нормировку распределений. Важно отметить, что среди этих параметров нет “стандартных” масс или ширин, поскольку сами эти понятия жёстко завязаны на определённый вид параметризации формы линии резонанса — на формулу Брейта-Вигнера. Как известно, в случае околопорогового резонанса, а тем более в случае нескольких близко расположенных околопороговых резонансов, комбинации распределений Брейта-Вигнера не являются адекватными параметризаци-

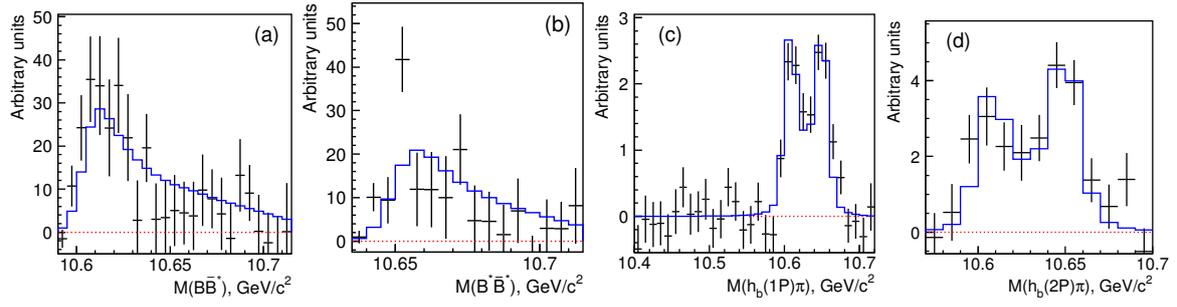


Рис. 2. Форма линии околопороговых состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$, полученная в результате одновременного фитирования данных в каналах $B^{(*)}\bar{B}^*$ и $\pi h_b(mP)$ ($m = 1, 2$).

ями и могут приводить к сильному нарушению унитарности и аналитичности. Наконец, распределение Брейта-Вигнера принципиально не описывает пороговые явления, своим происхождением обязанные явной зависимости петлевых операторов от энергии.

Данные по неупругим каналам $\pi\Upsilon(nS)$ не могут быть корректно учтены в одномерном фите ввиду присутствия большой нерезонансной компоненты, зависящей от $M(\pi^+\pi^-)$, для учёта которой необходим многомерный анализ, поэтому в фите учтены лишь их полные брэнчинги. Результат одновременного фитирования данных для состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ в каналах $B^{(*)}\bar{B}^*$ [68] и $\pi h_b(mP)$ ($m = 1, 2$) [41] приведён на рис. 2. Степень достоверности описания весьма высока: $CL=48\%$. Для полноты картины в диссертации обсуждаются также другие фиты как к новым данным [68], так и к старым данным [69] по каналам распада $B^{(*)}\bar{B}^*$. В частности, обсуждается вопрос совместимости данных с требованиями симметрии тяжёлого кварка, и делается вывод о лучшем согласии новых данных с такими требованиями.

Завершает вторую главу теоретический анализ параметров, извлечённых из фита к экспериментальным данным. В частности, с помощью найденных значений параметров определено положение полюсов в комплексной плоскости,

отвечающих околопороговым состояниям в каналах с квантовыми числами 1^{+-} и, таким образом, сделан вывод о природе состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$. Так, проанализированные данные указывают на то, что оба эти состояния являются виртуальными уровнями (в строгом смысле слова — резонансами, поскольку оба полюса несколько смещены с вещественной оси за счёт связи каналов), лежащими в пределах примерно 1-2 МэВ ниже соответствующих порогов. Заметим, что полученное совместное описание данных и заключения, сделанные относительно природы состояний Z_b , являются весомым аргументом в пользу их динамической природы как адронных молекулярных состояний. Действительно, только существенная примесь молекулы делает возможным возникновение виртуального уровня, тогда как из решения уравнения Шредингера для многокварковой системы (например, для тетракварка) могут возникать лишь связанные состояния. Несмотря на большую неопределённость в данных и на то, что извлечённые из них значения параметров также достаточно сильно меняются от фита к фиту, тем не менее, положение соответствующих полюсов матрицы рассеяния весьма устойчиво, так что природу состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ можно считать надёжно установленной уже на основании имеющихся данных.

Третья глава диссертации посвящена обсуждению трёхчастичных эффектов в околопороговых резонансах. Во второй главе при выводе параметризации формы линии околопороговых резонансов, как упругие, так и неупругие каналы считались двухчастичными, то есть соответствующие адроны рассматривались стабильными. В реальности однако это не так, поэтому необходимо установить критерий, при выполнении которого конечной шириной конститuentов действительно можно пренебрегать в расчётах, а также предложить подход, позволяющий учитывать нестабильность конститuentов, если в этом есть

необходимость. Очевидно, что главный эффект ожидается от двухчастичных мод распада конститuentов. Типичным примером рассматриваемой ситуации может служить состояние в спектре чармония $X(3872)$. Действительно, ввиду близости данного резонанса к нейтральному двухчастичному порогу $D\bar{D}^*$, смесь соответствующей адронной компоненты в волновой функции резонанса может быть весьма велика. При этом D^* мезон является нестабильным и может переходить в D мезон с испусканием фотона или пиона [70]. С одной стороны, соответствующие ширины крайне малы и составляют величины порядка всего лишь нескольких десятков кэВ. Но, с другой стороны, нейтральный трёхчастичный порог $D\bar{D}\pi$ лежит всего примерно в 7 МэВ от нейтрального двухчастичного порога $D\bar{D}^*$, причём ниже его по энергии. Такое взаимное расположение двух- и трёхчастичных порогов имеет несколько последствий для свойств изучаемого резонанса. Например, если $X(3872)$ является связанным состоянием, то распады D^* мезона в его составе происходят ниже номинального двухчастичного порога, так что в форме линии резонанса должен проявляться подпороговый пик. С другой стороны, близость двух- и трёхчастичных порогов приводит к тому, что пион в промежуточном состоянии в цепочке переходов $D\bar{D}^* \rightarrow D\bar{D}\pi \rightarrow D\bar{D}^* \dots$ находится очень близко к массовой поверхности [71], и влияние трёхчастичного разреза на динамику системы может быть весьма ощутимым. Таким образом, состояние $X(3872)$ позволяет детально исследовать вопрос о влиянии трёхчастичной динамики на природу и форму линии околорогового резонанса. Этот вопрос подробно изложен в четвёртой главе диссертации, а в данной главе рассматриваются примеры более простого, эффективного описания трёхчастичной динамики. В частности, определён феноменологический параметр, даваемый отношением ширины конститuenta к раздвижке двух и трёхчастичных порогов, по величине которого можно судить о

вкладе трёхчастичных эффектов и о возможности использования феноменологического эффективного подхода, позволяющего не расширять двухчастичный базис модели связанных каналов, а использовать эффективно двухчастичные выражения для дифференциальных вероятностей рождения упругих и неупругих каналов.

В диссертации подробно разобран пример ситуации, возникающей для больших значений введённого параметра. В частности, продемонстрирована необходимость непертурбативного учёта эффектов трёхчастичной унитарности в системе $D_1\bar{D}^*$, где $D_1(2430)$ и $D^*(2010)$ есть P -волновой и S -волновой тяжёло-лёгкие мезоны с квантовыми числами 3P_1 и 3S_1 соответственно. Мезон $D_1(2430)$ имеет большую ширину, обусловленную, в первую очередь, его однопсионным переходом в состояние $D^*(2010)$. Таким образом, извлечённая из ширины такого распада константа связи оказывается достаточно большой. Наивно можно было бы ожидать, что наличие большой константы связи должно приводить к возникновению глубоко связанных состояний в рассматриваемой системе [72, 73]. В диссертации показана ошибочность данного вывода, проистекающего из сильного нарушения трёхчастичной унитарности в наивном потенциальном подходе, игнорирующем эффекты трёхчастичной унитарности. При этом окончательный результат можно в краткой форме сформулировать следующим образом: унитарность требует, чтобы, если константа распада настолько велика, что обеспечивает возникновение глубоко связанных состояний, то она с неизбежностью приводит к возникновению у таких состояний настолько большой ширины, что они становятся ненаблюдаемыми.

Ввиду приведённых в третьей главе рассуждений и выкладок, демонстрирующих возможное значительное влияние трёхчастичной динамики в околопороговом резонансе на его свойства и, в частности, обсуждения взаимосвязи ве-

личины константы связи распада нестабильного конституента и вклада трёхчастичной унитарности, следует заметить, что особое значение имеют сильные распады с участием пиона. Так, в рассмотренном выше примере трёхчастичная динамика возникла за счёт распада $D_1 \rightarrow D^* \pi$, а в следующих главах диссертации подробно изучается трёхчастичная динамика в чармонийподобном состоянии $X(3872)$, возникающая за счёт перехода $D^* \rightarrow D \pi$. Это происходит в силу особой роли, которую пион играет в спектре адронов благодаря своей уникальной двойкой природе: пион одновременно является и легчайшим состоянием в спектре адронов, и псевдоголдстоуновским бозоном, возникающим вследствие спонтанного нарушения киральной инвариантности в вакууме КХД. Последнее свойство позволяет сделать некоторые предсказания относительно величины связи пиона с возбуждёнными адронами. Далее, в третьей главе диссертации константа связи пиона с адронами обсуждается в рамках обобщённой модели Намбу-Иона-Лазинио, предложенной в работах [74–77], независимо изучавшейся в гамильтоновом формализме в работах [78–83], а также в более поздних работах [84–88] и [14, 15, 19]. В рамках указанной модели на микроскопическом уровне [17, 18] продемонстрировано эффективное восстановление киральной симметрии в спектре высоковозбуждённых адронов [89–94], одним из специфических предсказаний которого является отщепление кирального пиона от спектра адронов, которое выражается в убывании соответствующей константы связи с ростом степени возбуждения адрона [93, 95–98]. Указанное свойство можно сформулировать с помощью соотношения Голдбергера-Треймана между константой связи пиона с киральными партнёрами и расщеплением по массе внутри такого кирального дублета, которое в рамках рассматриваемой модели выведено микроскопически [21, 22]. Данное соотношение означает, что с ростом степени возбуждения мезона и, соответственно, по мере увели-

чения степени его вырождения со своим киральным партнёром, связь пиона с данным мезоном убывает. В соответствии с полученными ранее результатами, это означает уменьшение роли трёхчастичной динамики в околопороговых резонансах, если таковые будут обнаружены на соответствующих порогах.

В четвёртой главе диссертации подробно исследованы свойства и природа состояния $X(3872)$, которое является наиболее хорошо изученным состоянием в спектре так называемых “бездомных” чармониев. Данное состояние было обнаружено в 2003 году коллаборацией Belle в реакции $B^+ \rightarrow K^+ X \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- J/\psi$ [40]. Несколько позже это же состояние было также обнаружено в моде $\pi^+ \pi^- \pi^0 J/\psi$ [99], причём изучение спектров пионов показало, что в случае двухпионного распада последние происходят от ρ мезона, тогда как в трёхпионной моде — от ω мезона. В 2006 году состояние $X(3872)$ было обнаружено в моде с открытым чармом, а именно в распаде $B^+ \rightarrow K^+ D^0 \bar{D}^0 \pi^0$ [100], причём с довольно большой относительной вероятностью. Также были измерены радиационные переходы X в чармонии J/ψ и $\psi(2S)$ [101–104]. В 2013 году, то есть спустя 10 лет после открытия $X(3872)$, его квантовые числа 1^{++} были окончательно установлены коллаборацией LHCb [105].

В диссертации свойства состояния $X(3872)$ изучены в рамках молекулярной модели, являющейся на данный момент наиболее общепринятой. Действительно, в силу близости массы X к нейтральному порогу $D\bar{D}^*$ естественно предположить, что дальнедействующая часть его волновой функции описывается S -волновой мезонной парой $D\bar{D}^*$, тогда как короткодействующая часть даётся 2^3P_1 чармонием χ'_{c1} (радиально возбуждённым аксиально-векторным $\bar{c}s$ состоянием). Во второй главе диссертации была предложена параметризация общего вида, позволяющая описывать околопороговые явления во всех экспериментально измеренных каналах одновременно. Имеющиеся в настоящий мо-

мент данные по модам распада $X(3872)$ описываются частным случаем такой параметризации, имеющим вид простого двухканального обобщения стандартного одноканального распределения Флатте [23, 24], в котором рассматриваемая физическая система содержит затравочный полюс, отождествляемый с чармонием χ'_{c1} , два упругих канала (заряженный и нейтральный каналы $D\bar{D}^*$, расщеплённые по энергии на величину $\delta = M(D^+D^{*-}) - M(D^0\bar{D}^{*0}) \approx 7$ МэВ), а также набор неупругих каналов, два из которых ($\rho J/\psi$ и $\omega J/\psi$) учитываются явно, а остальные — эффективно, в виде дополнительной неупругости, которая насыщается различными аннигиляционными модами распада X в лёгкие адроны, радиационными распадами, двухпионными модами типа $X \rightarrow \chi_{1c}(3515)\pi\pi$ и т.д. Задача при этом состоит в одновременном анализе экспериментальных данных в каналах $\rho J/\psi$ и $D\bar{D}^*$.

К сожалению, данные в упругом канале $D\bar{D}^*$ имеются лишь в надпороговой области, где кривые для виртуального и реального уровней могут иметь очень похожий вид, а разрешение в неупругом канале не позволяет однозначно установить положение пика. Таким образом, для извлечения природы $X(3872)$ приходится прибегнуть к опосредованному методу и рассмотреть длину рассеяния. Положительный знак действительной части длины рассеяния отвечает связанному состоянию, а отрицательный — виртуальному уровню. Таким образом, для каждого набора экспериментальных данных рассматриваются по два набора параметров (для связанного состояния и для виртуального уровня), обеспечивающих наилучшее одновременное описание данных в упругом и неупругом каналах.

Полученные описания данных позволяют сделать некоторые выводы о природе состояния $X(3872)$. Во-первых, данные существенно лучше описываются в предположении о том, что $X(3872)$ является связанным состоянием, а

не виртуальным уровнем. Во-вторых, сделанные оценки указывает на примерно 50-процентную примесь чармония χ'_{c1} в волновой функции X . В-третьих, как обсуждалось выше, в случае связанного состояния конечная ширина конститuenta приводит к возникновению подпорогового пика в упругом канале [106, 107]. Ввиду малости ширины D^{*0} ранее этим эффектом было пренебрежено. Для его оценки достаточно воспользоваться простым рецептом включения конечной ширины конститuenta, предложенным в работах [106–108]. В результате можно найти, что, как и ожидалось, учёт конечной ширины D^{*0} затрагивает лишь первый (в основном подпороговый) бин, тогда как, начиная со второго бина, данный эффект совершенно незаметен.

Следующим затронутым в четвёртой главе диссертации вопросом является соотношение вероятностей радиационных распадов состояния $X(3872)$ в рамках принятой модели. В литературе можно встретить мнение, что в молекулярной картине невозможно получить сравнимое с единицей отношение R вероятностей распадов в конечные состояния $\gamma\psi'$ и $\gamma J/\psi$ (см., например, работу [109]). В четвёртой главе в молекулярной картине и в рамках явно калибровочно инвариантного подхода вычислены вероятности данных радиационных распадов, протекающих через D -мезонную петлю. При этом показано, что никакого противоречия с экспериментальными данными нет — при достаточно естественных предположениях о неизвестных параметрах модели (в частности, об отношении констант связи чармониев J/ψ и ψ' с D мезонами) экспериментальное отношение $R \simeq 2$ [103] может быть воспроизведено. На основании произведённых расчётов сделан вывод о том, что радиационные распады $X(3872)$ и, в частности, отношение ширин R , более чувствительно к короткодействующей части волновой функции X , чем к её далекодействующей части. Поэтому данные распады могут использоваться для определения природы X лишь опо-

средованно.

Следующим вопросом, касающимся свойств состояния $X(3872)$ и рассмотренным в четвёртой главе диссертации, является вычисление вероятности его прямого рождения в e^+e^- соударениях. Для удобства вычислений рассмотрен обратный процесс аннигиляции $X \rightarrow e^+e^-$, и вычислена соответствующая электронная ширина $X(3872)$. В частности, в модели векторной доминантности получена следующая оценка:

$$\Gamma(X \rightarrow e^+e^-) \gtrsim 0.03 \text{ эВ}. \quad (2)$$

Аналогичный подход, применённый к вычислению ширины $\Gamma(\chi_{c1} \rightarrow e^+e^-)$, где χ_{c1} есть истинный аксиально-векторный чармоний с массой $m_{\chi_{c1}} = 3511 \text{ МэВ}$, приводит к оценке $\Gamma(\chi_{c1} \rightarrow e^+e^-) \simeq 0.1 \text{ кэВ}$. Этот результат находится в качественном согласии с оценкой $\Gamma(\chi_{c1} \rightarrow e^+e^-) \simeq 0.46 \text{ эВ}$, полученной в работах [110, 111] и лежит выше унитарного нижнего предела 0.044 эВ [110].

Объединяя оба результата, нетрудно прийти к следующему соотношению:

$$\Gamma(X \rightarrow e^+e^-) : \Gamma(\chi_{c1} \rightarrow e^+e^-) \gtrsim 1 : 3, \quad (3)$$

в котором часть неопределённостей может сократиться, так что есть основания рассчитывать на его бóльшую точность, нежели точность вычисления каждой из ширин в отдельности. Таким образом, вероятность прямого рождения $X(3872)$ в единицу времени в e^+e^- столкновениях оказывается того же порядка величины, что и вероятность прямого рождения чармония χ_{c1} , так что данный процесс может оказаться доступным для экспериментального измерения. На данный момент лучшее экспериментальное ограничение на вероятность прямого рождения $X(3872)$ поставлено в работе [112] и составляет $\Gamma(X \rightarrow e^+e^-) \lesssim 0.13 \text{ эВ}$, что совместимо с полученными выше теоретическими оценками. Заметим также, что приведённые в диссертации расчёты и, в частности,

величина ширины распада $\Gamma_{\chi_{c1}}$ подтверждены независимыми микроскопическими расчётами, выполненными в рамках нерелятивистской КХД [113]. Наблюдение прямого рождения чармония χ_{c1} уже является частью научной программы эксперимента BESIII [112]. В зависимости от полученных результатов вопрос о включении в программу измерений процесса прямого рождения $X(3872)$ также может быть решён положительно.

К сожалению, доступные на сегодняшний день экспериментальные данные не позволяют извлекать из них столь тонкие эффекты, как влияние трёхчастичной динамики на свойства окологороговых резонансов, однако в будущем такая возможность может появиться. Кроме того, информацию об окологороговых резонансах начинают поставлять решёточные расчёты, в связи с чем полное непертурбативное описание пионной динамики в таких резонансах становится насущной задачей. В четвёртой главе диссертации такое описание выполнено на основе трёхчастичных уравнений типа уравнений Фаддеева. Ключевыми элементами подхода являются потенциал однопионного обмена в $D\bar{D}^*$ системе и построенная с его участием система уравнений связанных каналов. Решение полученной системы уравнений позволяет вычислить дифференциальную вероятность рождения $X(3872)$ в канале $D\bar{D}\pi$, в том числе между двух- и трёхчастичными порогами, то есть в области, на данный момент не доступной для экспериментального изучения. Таким образом, предлагаемый подход позволяет изучать свойства $X(3872)$, как связанного состояния и, в частности, роль трёхчастичной пионной динамики в нём.

В качестве примера применения предложенного метода изучен пик связанного состояния $X(3872)$, в частности, ширина такого пика извлечена в статическом приближении, а также в полной теории. Основной вывод состоит в том, что использование наивного статического приближения для пионной ди-

намики в $X(3872)$ приводит к существенной (двукратной при энергии связи $E_B = 0.5$ МэВ) переоценке её вклада в ширину X . Поскольку, как следует из анализа данных, X является связанным состоянием, то важной частью его формы линии является подпороговая область, то есть сигнал, лежащий между нейтральными двух- и трёхчастичными порогами — именно в той области, где трёхчастичный разрез $D\bar{D}\pi$ играет важную роль. Таким образом, сделан вывод о том, что полноценный учёт трёхчастичной динамики крайне важен для описания свойств $X(3872)$.

В пятой главе диссертации непertурбативный подход к описанию состояния $X(3872)$, основанный на системе уравнений связанных каналов, применяется к построению киральной экстраполяции энергии связи $X(3872)$ по массе лёгкого кварка (или, что эквивалентно, по массе пиона).

Как известно, решёточные расчёты, выполняемые, исходя из первых принципов КХД, являются альтернативным по отношению к эксперименту источником информации об адронных состояниях. Благодаря быстрому росту мощности современных компьютеров, а также благодаря появлению большого числа компьютерных кластеров, обладающих высокой производительностью, современные решёточные расчёты в состоянии ответить на многие вопросы, относящиеся к физике сильных взаимодействий. Недавно стали появляться первые результаты расчётов свойств экзотических состояний в спектре чармония, в частности, свойств состояния $X(3872)$ [42–44]. К сожалению, все такие расчёты обладают рядом недостатков, устранение которых в настоящий момент, по-видимому, не представляется возможным. Прежде всего, точность расчётов весьма невысока, например, ошибка в энергии связи оказывается порядка самой энергии связи. Кроме того, используемый размер решётки $L \simeq 2$ Фм явно недостаточен для надёжного описания околопороговых состояний, волновая

функция которых содержит “рыхлую” молекулярную компоненту [114]. Наконец, все подобные расчёты выполнены для достаточно большой массы пиона, примерно вдвое превышающей его физическую массу. Большинство указанных недостатков может быть исправлено исключительно улучшением методики вычислений и увеличением вычислительной мощности используемых компьютеров. Однако проблема нефизической массы пиона на решётке может быть, если не снята полностью, то существенно нивелирована с помощью феноменологического подхода, развиваемого в диссертации. Действительно, масса пиона входит во все проведённые выше вычисления исключительно в виде параметра, что позволяет её практически произвольно изменять (сохраняя иерархию масштабов, которая важна при формулировании и решении задачи связанных каналов), в том числе увеличивать до значения $m_\pi = 266$ МэВ, использованного в решёточных расчётах в работах [42–44].

Заметим, что важным условием возможности изменения массы пиона в уравнениях является полноценный (желательно непертурбативный) учёт в них трёхчастичной динамики, которая претерпевает существенные изменения при увеличении массы пиона. В частности, при $m_\pi > m_* - m$ (m_* и m обозначают массы D^* и D мезонов) исчезает трёхчастичный разрез. Выведенная в четвёртой главе система уравнений для задачи связанных каналов полностью удовлетворяет указанному требованию, что позволяет решить с её помощью задачу о киральной экстраполяции энергии связи $X(3872)$ от физической массы пиона до нефизически большой массы, используемой на решётке.

На основании результатов вычислений можно сделать несколько выводов. Во-первых, трёхчастичная пионная динамика в $X(3872)$ важна при построении киральных экстраполяций, поскольку результаты полного расчёта существенно отличаются от предсказаний чисто контактной теории. Во-вторых, постро-

енная динамическая модель совместима как с убывающей, так и с возрастающей энергией связи как функцией массы пиона в зависимости от поведения контактного взаимодействия. В-третьих, предсказания модели совместимы с решёточными результатами, полученными в работах [42–44]. Важно отметить, что полученные результаты полностью подтверждены независимым расчётом, проведённым в рамках релятивизованной модели в работе [115].

Заметим также, что построенная в диссертации динамическая модель околопорогового резонанса, допускающая интерпретацию массы пиона в качестве параметра, позволяет обратить из недостатка в достоинство свойство решёточных расчётов использовать нефизические массы пиона. Действительно, при наличии должным образом построенной экстраполирующей функции по массе пиона решёточные расчёты позволяют получать информацию об изучаемой системе в области параметров, недоступной в реальном эксперименте. Так, сопоставив теоретические и решёточные расчёты при нескольких значениях массы пиона, можно рассчитывать извлечь полезную информацию о короткодействующих силах в $X(3872)$, необходимую для построения микроскопических моделей, призванных объяснить и описать такие силы.

В заключение важно отметить, что предложенный подход допускает естественное обобщение на другие околопороговые состояния и при наличии необходимых решёточных данных позволяет извлекать из них информацию о природе таких экзотических состояний в спектре тяжёлых кварков.

В Заключении диссертации перечислены основные результаты, полученные в диссертации, сформулированы выводы, а также содержатся благодарности.

Список публикаций

1. Baru V., Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., Kudryavtsev A. E., **Nefediev, A. V.** Interplay of quark and meson degrees of freedom in a near-threshold resonance // *Eur. Phys. J.* — 2010. — Vol. A44. — P. 93–103. — 1001.0369.
2. Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., **Nefediev, A. V.** Interplay of quark and meson degrees of freedom in a near-threshold resonance: multi-channel case // *Eur. Phys. J.* — 2011. — Vol. A47. — P. 101–110. — 1106.1185.
3. **Nefediev, A. V.** Line shapes of near-threshold resonances // 2nd SuperB Collaboration Meeting, 13-16 December 2011, Frascati, Italy. — 2011.
4. Drutskoy A. G., Guo F.-K., Llanes-Estrada F. J., **Nefediev, A. V.**, Torres-Rincon J. M. Hadron physics potential of future high-luminosity B-factories at the $\Upsilon(5S)$ and above // *Eur. Phys. J.* — 2013. — Vol. A49. — P. 7–32. — 1210.6623.
5. Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., Matuschek P., Mizuk R. V., **Nefediev, A. V.**, Wang Q. A practical parametrization for line shapes of near-threshold states // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Vol. 115. — P. 202001. — 1507.00382.
6. Guo F. K., Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., Matuschek P., Mizuk R. V., **Nefediev, A. V.**, Wang Q., Wynen J. L. Interplay of quark and meson degrees of freedom in near-threshold states: A practical parametrisation for line shapes // *Phys. Rev.* — 2016. — Vol. D93, no. 7. — P. 074031. — 1602.00940.
7. Hanhart C., Kalashnikova Y. S., Matuschek P., Mizuk R. V., **Nefediev, A. V.**, Wang Q. A practical parametrisation of line shapes of near-threshold resonances // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 675, no. 2. — P. 022016.
8. **Nefediev, A. V.** Physics of near-threshold resonances: phenomenology and applications // Bethe Forum: "Exotic Hadrons", 23 April — 4 May 2012, Bonn, Germany. — 2012.

9. **Nefediev, A. V.** Interplay of quark and meson degrees of freedom in a near-threshold resonance // 8th International Workshop on Heavy Quarkonium QWG 2011, 4-7 October 2011, Darmstadt, Germany. — 2011.
10. **Nefediev, A. V.** Phenomenology of near-threshold states // 1st International Workshop on Exotic Hadrons, 3-5 September 2015, Istanbul, Turkey. — 2012.
11. **Nefediev, A. V.** Phenomenology of near-threshold resonances // International Moscow School of Physics (ITEP Winter School), 16-23 February 2016, Moscow, Russia. — 2016.
12. Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., **Nefediev, A. V.** Lineshapes for composite particles with unstable constituents // *Phys. Rev.* — 2010. — Vol. D81. — P. 094028. — 1002.4097.
13. Filin A. A., Romanov A., Baru V., Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., Kudryavtsev A. E., Meissner U. G., **Nefediev, A. V.** Comment on ‘Possibility of Deeply Bound Hadronic Molecules from Single Pion Exchange’ // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Vol. 105. — P. 019101. — 1004.4789.
14. **Nefediev, A. V.**, Ribeiro J. E. F. T. Mesonic states and vacuum replicas in potential quark models for QCD // *Phys. Rev.* — 2004. — Vol. D70. — P. 094020. — hep-ph/0409112.
15. **Nefediev, A. V.**, Ribeiro J. E. F. T. Mesonic states in the generalised Nambu-Jona-Lasinio theories // *AIP Conf. Proc.* — 2005. — Vol. 756. — P. 333–335. — hep-ph/0411141.
16. Glozman L. Y., **Nefediev, A. V.**, Ribeiro J. E. F. T. Chiral symmetry restoration in excited hadrons, quantum fluctuations, and quasiclassics // *Phys. Rev.* — 2005. — Vol. D72. — P. 094002. — hep-ph/0510012.
17. Kalashnikova Yu. S., **Nefediev, A. V.**, Ribeiro J. E. F. T. Confinement and parity doubling in heavy-light mesons // *Phys. Rev.* — 2005. — Vol. D72. —

P. 034020. — hep-ph/0507330.

18. Kalashnikova Yu. S., **Nefediev, A. V.**, Ribeiro J. E. F. T. Parity doublers in chiral potential quark models // AIP Conf. Proc. — 2007. — Vol. 892. — P. 289–292. — hep-ph/0611081.
19. Bicudo P. J. A., **Nefediev, A. V.** Chiral symmetry breaking solutions for QCD in the truncated Coulomb gauge // Phys. Rev. — 2003. — Vol. D68. — P. 065021. — hep-ph/0307302.
20. Bicudo P. J. A., **Nefediev, A. V.** Vacuum replicas in two-dimensional QCD // Phys. Lett. — 2003. — Vol. B573. — P. 131–137. — hep-ph/0308273.
21. Glozman L. Y., **Nefediev, A. V.** On goldstone bosons decoupling from high-lying hadrons // Phys. Rev. — 2006. — Vol. D73. — P. 074018. — hep-ph/0603025.
22. **Nefediev, A. V.**, Ribeiro J. E. F. T., Szczepaniak A. P. Microscopic derivation of the pion coupling to heavy-light mesons // Phys. Rev. — 2007. — Vol. D75. — P. 036001. — hep-ph/0610430.
23. Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., Kudryavtsev A. E., **Nefediev, A. V.** Reconciling the X(3872) with the near-threshold enhancement in the $D^0 \bar{D}^{*0}$ final state // Phys. Rev. — 2007. — Vol. D76. — P. 034007. — 0704.0605.
24. Kalashnikova Yu. S., **Nefediev, A. V.** Nature of X(3872) from data // Phys. Rev. — 2009. — Vol. D80. — P. 074004. — 0907.4901.
25. Kalashnikova Yu. S., Kudryavtsev A. E., **Nefediev, A. V.** Quark and meson degrees of freedom in the X(3872) charmonium // Phys. Atom. Nucl. — 2010. — Vol. 73. — P. 1592–1611.
26. Kalashnikova Yu. S., **Nefediev, A. V.** X(3872) as a 1D_2 charmonium state // Phys. Rev. — 2010. — Vol. D82. — P. 097502. — 1008.2895.
27. Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., Kudryavtsev A. E., **Nefediev, A. V.** Remarks on the quantum numbers of X(3872) from the invariant mass distributions of the

- $\rho J/\psi$ and $\omega J/\psi$ final states // Phys. Rev. — 2012. — Vol. D85. — P. 011501. — 1111.6241.
28. Baru V., Filin A. A., Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., Kudryavtsev A. E., **Nefediev, A. V.** Three-body $D\bar{D}\pi$ dynamics for the X(3872) // Phys. Rev. — 2011. — Vol. D84. — P. 074029. — 1108.5644.
29. Kalashnikova Yu. S., **Nefediev, A. V.** X(3872) as the 1D_2 charmonium // Phys. Atom. Nucl. — 2013. — Vol. 76. — P. 1533–1540.
30. Kalashnikova Yu. S., **Nefediev, A. V.** One-pion exchange in the X(3872) revisited // Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 2013. — Vol. 97. — P. 76–81. — [JETP Lett.97,70(2013)]. 1212.2004.
31. Denig A., Guo F.-K., Hanhart C., **Nefediev, A. V.** Direct X(3872) production in e^+e^- collisions // Phys. Lett. — 2014. — Vol. B736. — P. 221–225. — 1405.3404.
32. Baru V., Epelbaum E., Filin A. A., Guo F. K., Hammer H. W., Hanhart C., Meissner U. G., **Nefediev, A. V.** Remarks on study of X(3872) from effective field theory with pion-exchange interaction // Phys. Rev. — 2015. — Vol. D91, no. 3. — P. 034002. — 1501.02924.
33. Guo F.-K., Hanhart C., Kalashnikova Yu. S., Meissner U.-G., **Nefediev, A. V.** What can radiative decays of the X(3872) teach us about its nature? // Phys. Lett. — 2015. — Vol. B742. — P. 394–398. — 1410.6712.
34. **Nefediev, A. V.** X(3872): Charmonium or molecule? // AIP Conf. Proc. — 2011. — Vol. 1343. — P. 394–396.
35. **Nefediev, A. V.** Nature of X(3872) from data // 447th Wilhelm and Else Heraeus Seminar: Charmed Exotics Bad Honnef, Germany, August 10-12, 2009. — 2009. — P. 20. — 0910.3165.
36. **Nefediev, A. V.** Some aspects of the X(3872) phenomenology // 1st Interna

- tional Workshop on Exotic Hadrons, 3-5 September 2015, Istanbul, Turkey. — 2012.
37. **Nefediev, A. V.** Direct X(3872) production in e^+e^- collisions // International Workshop "New Hadrons", 25 September 2014, Moscow, Russia. — 2014.
38. Baru V., Epelbaum E., Filin A. A., Hanhart C., Meissner U. G., **Nefediev, A. V.** Quark mass dependence of the X(3872) binding energy // Phys. Lett. — 2013. — Vol. B726. — P. 537–543. — 1306.4108.
39. Baru V., Epelbaum E., Filin A. A., Gegelia J., **Nefediev, A. V.** Chiral extrapolation of the X(3872) binding energy // J. Phys. Conf. Ser. — 2016. — Vol. 675, no. 2. — P. 022017.

Цитированная литература

40. Choi S. K. et al. Observation of a narrow charmonium-like state in exclusive $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays // Phys. Rev. Lett. — 2003. — Vol. 91. — P. 262001. — hep-ex/0309032.
41. Bondar A. et al. Observation of two charged bottomonium-like resonances in Y(5S) decays // Phys. Rev. Lett. — 2012. — Vol. 108. — P. 122001. — 1110.2251.
42. Prelovsek S., Leskovec L. Evidence for X(3872) from $D\bar{D}^*$ scattering on the lattice // Phys. Rev. Lett. — 2013. — Vol. 111. — P. 192001. — 1307.5172.
43. Lee S.-h., DeTar C., Na H., Mohler D. Searching for the X(3872) and $Z_c^+(3900)$ on HISQ Lattices. — 2014. — 1411.1389.
44. Padmanath M., Lang C. B., Prelovsek S. X(3872) and Y(4140) using diquark-antidiquark operators with lattice QCD // Phys. Rev. — 2015. — Vol. D92, no. 3. — P. 034501. — 1503.03257.
45. Bondar A. E., Garmash A., Milstein A. I., Mizuk R., Voloshin M. B. Heavy

- quark spin structure in Z_b resonances // *Phys. Rev.* — 2011. — Vol. D84. — P. 054010. — 1105.4473.
46. Voloshin M. B. Radiative transitions from $\Upsilon(5S)$ to molecular bottomonium // *Phys. Rev.* — 2011. — Vol. D84. — P. 031502. — 1105.5829.
47. Maiani L., Piccinini F., Polosa A. D., Riquer V. Diquark-antidiquarks with hidden or open charm and the nature of $X(3872)$ // *Phys. Rev.* — 2005. — Vol. D71. — P. 014028. — hep-ph/0412098.
48. Bigi I., Maiani L., Piccinini F., Polosa A. D., Riquer V. Four-quark mesons in non-leptonic B decays: Could they resolve some old puzzles? // *Phys. Rev.* — 2005. — Vol. D72. — P. 114016. — hep-ph/0510307.
49. Ali A., Hambrock C., Mishima S. Tetraquark-based analysis and predictions of the cross sections and distributions for the processes $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(1S)(\pi^+\pi^-, K^+K^-, \eta\pi^0)$ near $\Upsilon(5S)$ // *Phys. Rev. Lett.* — 2011. — Vol. 106. — P. 092002. — 1011.4856.
50. Ali A., Hambrock C., Wang W. Tetraquark Interpretation of the Charged Bottomonium-like states $Z_b^{+-}(10610)$ and $Z_b^{+-}(10650)$ and Implications // *Phys. Rev.* — 2012. — Vol. D85. — P. 054011. — 1110.1333.
51. Ebert D., Faustov R. N., Galkin V. O. Masses of heavy tetraquarks in the relativistic quark model // *Phys. Lett.* — 2006. — Vol. B634. — P. 214–219. — hep-ph/0512230.
52. Ebert D., Faustov R. N., Galkin V. O., Lucha W. Masses of tetraquarks with two heavy quarks in the relativistic quark model // *Phys. Rev.* — 2007. — Vol. D76. — P. 114015. — 0706.3853.
53. Pakhlov P. Charged charmonium-like states as rescattering effects in $B \rightarrow D_{sJ}D^{(*)}$ decays // *Phys. Lett.* — 2011. — Vol. B702. — P. 139–142. — 1105.2945.

54. Pakhlov P., Uglov T. Charged charmonium-like $Z^+(4430)$ from rescattering in conventional B decays // *Phys. Lett.* — 2015. — Vol. B748. — P. 183–186. — 1408.5295.
55. Achasov N. N., Kozhevnikov A. A. On the Nature of $C(1480)$ Resonance // *Z. Phys.* — 1990. — Vol. C48. — P. 121–130.
56. Szczepaniak A. P. Triangle Singularities and XYZ Quarkonium Peaks // *Phys. Lett.* — 2015. — Vol. B747. — P. 410–416. — 1501.01691.
57. Dubynskiy S., Gorsky A., Voloshin M. B. Holographic Hadro-Quarkonium // *Phys. Lett.* — 2009. — Vol. B671. — P. 82–86. — 0804.2244.
58. Li X., Voloshin M. B. $Y(4260)$ and $Y(4360)$ as mixed hadrocharmonium // *Mod. Phys. Lett.* — 2014. — Vol. A29, no. 12. — P. 1450060. — 1309.1681.
59. Danilkin I. V., Simonov Yu. A. Channel coupling in heavy quarkonia: Energy levels, mixing, widths and new states // *Phys. Rev.* — 2010. — Vol. D81. — P. 074027. — 0907.1088.
60. Danilkin I. V., Simonov Yu. A. Dynamical origin and the pole structure of $X(3872)$ // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Vol. 105. — P. 102002. — 1006.0211.
61. Danilkin I. V., Orlovsky V. D., Simonov Yu. A. Hadron interaction with heavy quarkonia // *Phys. Rev.* — 2012. — Vol. D85. — P. 034012. — 1106.1552.
62. Danilkin I. V., Orlovsky V. D., Simonov Yu. A. Hadro-quarkonia dynamics and Z_b states // *Phys. Atom. Nucl.* — 2013. — Vol. 76. — P. 1135–1143.
63. Kalashnikova Yu. S. Coupled-channel model for charmonium levels and an option for $X(3872)$ // *Phys. Rev.* — 2005. — Vol. D72. — P. 034010. — hep-ph/0506270.
64. Flatte S. M. Coupled - Channel Analysis of the π η and K anti- K Systems Near K anti- K Threshold // *Phys. Lett.* — 1976. — Vol. B63. — P. 224.
65. Liu L., Lin H.-W., Orginos K. Charmed Hadron Interactions // *PoS.* — 2008. —

Vol. LATTICE2008. — P. 112. — 0810.5412.

66. Nakano K. Two potential formalism and the Coulomb-nuclear interference // Phys. Rev. — 1982. — Vol. C26. — P. 1123–1131.
67. Hanhart C. A New Parameterization for the Pion Vector Form Factor // Phys. Lett. — 2012. — Vol. B715. — P. 170–177. — 1203.6839.
68. Garmash A. et al. Observation of $Z_b(10610)$ and $Z_b(10650)$ Decaying to B Mesons // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 116, no. 21. — P. 212001. — 1512.07419.
69. Adachi I. et al. Study of Three-Body $Y(10860)$ Decays. — 2012. — 1209.6450.
70. Olive K. A. et al. Review of Particle Physics // Chin. Phys. — 2014. — Vol. C38. — P. 090001.
71. Suzuki M. The $X(3872)$ boson: Molecule or charmonium // Phys. Rev. — 2005. — Vol. D72. — P. 114013. — hep-ph/0508258.
72. Close F., Downum C. On the possibility of Deeply Bound Hadronic Molecules from single Pion Exchange // Phys. Rev. Lett. — 2009. — Vol. 102. — P. 242003. — 0905.2687.
73. Close F., Downum C., Thomas C. E. Novel Charmonium and Bottomonium Spectroscopies due to Deeply Bound Hadronic Molecules from Single Pion Exchange // Phys. Rev. — 2010. — Vol. D81. — P. 074033. — 1001.2553.
74. Amer A., Le Yaouanc A., Oliver L., Pene O., Raynal J. c. Instability of the chiral invariant vacuum for a confining potential // Phys. Rev. Lett. — 1983. — Vol. 50. — P. 87–90.
75. Le Yaouanc A., Oliver L., Pene O., Raynal J. C. Chiral Noninvariant Solutions of the Gap Equation for a Confining Potential // Phys. Lett. — 1984. — Vol. B134. — P. 249.
76. Le Yaouanc A., Oliver L., Pene O., Raynal J. C. Spontaneous Breaking of Chi

- ral Symmetry for Confining Potentials // Phys. Rev. — 1984. — Vol. D29. — P. 1233–1257.
77. Le Yaouanc A., Oliver L., Ono S., Pene O., Raynal J. C. A Quark Model of Light Mesons with Dynamically Broken Chiral Symmetry // Phys. Rev. — 1985. — Vol. D31. — P. 137–159.
78. Bicudo P. J. d. A., Ribeiro J. E. F. T. Current Quark Model in a p Wave Triplet Condensed Vacuum. 1. The Dynamical Breaking of Chiral Symmetry // Phys. Rev. — 1990. — Vol. D42. — P. 1611–1624.
79. Bicudo P. J. d. A., Ribeiro J. E. F. T. Current Quark Model in a p Wave Triplet Condensed Vacuum. 2. Salpeter Equations: π , K , ρ , ϕ as $q\bar{q}$ Bound States // Phys. Rev. — 1990. — Vol. D42. — P. 1625–1634.
80. Bicudo P. J. d. A., Ribeiro J. E. F. T. Current Quark Model in p Wave Triplet Condensed Vacuum. 3. Generalized R.G.M. Equations: The ϕ and ρ Resonances // Phys. Rev. — 1990. — Vol. D42. — P. 1635–1650.
81. Bicudo P. J. d. A. Nuclear matter may enhance chiral symmetry breaking // Phys. Rev. Lett. — 1994. — Vol. 72. — P. 1600–1603.
82. Bicudo P. J. A. A New perspective on the scalar meson puzzle, from spontaneous chiral symmetry breaking beyond BCS // Phys. Rev. — 1999. — Vol. C60. — P. 035209. — nucl-th/9802058.
83. Bicudo P. J. A., Ribeiro J. E. F. T., **Nefediev, A. V.** Vacuum replicas in QCD // Phys. Rev. — 2002. — Vol. D65. — P. 085026. — hep-ph/0201173.
84. **Nefediev, A. V.**, Ribeiro J. E. F. T. Field theory description of vacuum replicas // Phys. Rev. — 2003. — Vol. D67. — P. 034028. — hep-ph/0212371.
85. **Nefediev, A. V.**, Ribeiro J. E. F. T. Quantum field theory approach to the vacuum replica in QCD // Quark confinement and the hadron spectrum. Proceedings, 5th International Conference, Gargnano, Italy, September 10-14, 2002. — 2002. —

P. 378–380. — hep-ph/0212104.

86. Nefedev A. V. Sigma state and vacuum replica // AIP Conf. Proc. — 2004. — Vol. 717. — P. 342–346.
87. Nefedev A. V., Ribeiro J. E. F. T. Are light hadronic coherent-like states possible? // AIP Conf. Proc. — 2007. — Vol. 892. — P. 526.
88. **Nefediev, A. V.**, Ribeiro J. E. F. T. Real-time approach to quark confined systems at finite temperatures // JETP Lett. — 2009. — Vol. 90. — P. 417–422. — [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.90,461(2009)]. 0906.1288.
89. Glozman L. Y. Parity doublets and chiral symmetry restoration in baryon spectrum // Phys. Lett. — 2000. — Vol. B475. — P. 329–334. — hep-ph/9908207.
90. Cohen T. D., Glozman L. Y. Chiral multiplets versus parity doublets in highly excited baryons // Phys. Rev. — 2001. — Vol. D65. — P. 016006. — hep-ph/0102206.
91. Cohen T. D., Glozman L. Y. Does one observe chiral symmetry restoration in baryon spectrum? // Int. J. Mod. Phys. — 2002. — Vol. A17. — P. 1327–1354. — hep-ph/0201242.
92. Glozman L. Y. $SU(2)(L) \times SU(2)(R)$ and $U(1)(A)$ restorations high in the hadron spectrum and what it tells us about // Phys. Lett. — 2002. — Vol. B539. — P. 257–265. — hep-ph/0205072.
93. Glozman L. Y. Chiral multiplets of excited mesons // Phys. Lett. — 2004. — Vol. B587. — P. 69–77. — hep-ph/0312354.
94. Glozman L. Y. Chiral symmetry restoration and the string picture of hadrons // Phys. Lett. — 2002. — Vol. B541. — P. 115–120. — hep-ph/0204006.
95. Jaffe R. L., Pirjol D., Scardicchio A. Pion decoupling and $SU(2)L \times SU(2)R$ restoration in the hadron spectrum // Phys. Rev. — 2006. — Vol. D74. — P. 057901.

96. Jaffe R. L., Pirjol D., Scardicchio A. Parity doubling and $SU(2)(L)\times SU(2)(R)$ restoration in the hadron spectrum // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Vol. 96. — P. 121601. — hep-ph/0511081.
97. Jaffe R. L., Pirjol D., Scardicchio A. Parity doubling among the baryons // *Phys. Rept.* — 2006. — Vol. 435. — P. 157–182. — hep-ph/0602010.
98. Cohen T. D., Glozman L. Y. A simple toy model for effective restoration of chiral symmetry in excited hadrons // *Mod. Phys. Lett.* — 2006. — Vol. A21. — P. 1939–1945. — hep-ph/0512185.
99. Abe K. et al. Evidence for $X(3872) \rightarrow \gamma J/\psi$ and the sub-threshold decay $X(3872) \rightarrow \omega J/\psi$ // *Lepton and photon interactions at high energies. Proceedings, 22nd International Symposium, LP 2005, Uppsala, Sweden, June 30-July 5, 2005.* — 2005. — hep-ex/0505037.
100. Gokhroo G. et al. Observation of a Near-threshold $D^0\bar{D}^0\pi^0$ Enhancement in $B \rightarrow D^0\bar{D}^0\pi^0 K$ Decay // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Vol. 97. — P. 162002. — hep-ex/0606055.
101. Aubert B. et al. Evidence for $X(3872) \rightarrow \psi(2S)\gamma$ in $B^\pm \rightarrow X(3872)K^\pm$ decays, and a study of $B \rightarrow c\bar{c}\gamma K$ // *Phys. Rev. Lett.* — 2009. — Vol. 102. — P. 132001. — 0809.0042.
102. Bhardwaj V. et al. Observation of $X(3872) \rightarrow J/\psi\gamma$ and search for $X(3872) \rightarrow \psi'\gamma$ in B decays // *Phys. Rev. Lett.* — 2011. — Vol. 107. — P. 091803. — 1105.0177.
103. Aaij R. et al. Evidence for the decay $X(3872) \rightarrow \psi(2S)\gamma$ // *Nucl. Phys.* — 2014. — Vol. B886. — P. 665–680. — 1404.0275.
104. Aaij R. et al. Quantum numbers of the X(3872) state and orbital angular momentum in its $\rho^0 J\psi$ decay // *Phys. Rev.* — 2015. — Vol. D92, no. 1. — P. 011102. — 1504.06339.

105. Aaij R. et al. Determination of the X(3872) meson quantum numbers // Phys. Rev. Lett. — 2013. — Vol. 110. — P. 222001. — 1302.6269.
106. Braaten E., Phillips D. The Renormalization group limit cycle for the $1/r^2$ potential // Phys. Rev. — 2004. — Vol. A70. — P. 052111. — hep-th/0403168.
107. Braaten E., Stapleton J. Analysis of $J/\psi\pi^+\pi^-$ and $D^0\bar{D}^0\pi^0$ Decays of the X(3872) // Phys. Rev. — 2010. — Vol. D81. — P. 014019. — 0907.3167.
108. Nauenberg M., Pais A. Peaks in mesonic systems. — 1964.
109. Swanson E. S. Diagnostic decays of the X(3872) // Phys. Lett. — 2004. — Vol. B598. — P. 197–202. — hep-ph/0406080.
110. Kuhn J. H., Kaplan J., Safiani E. G. O. Electromagnetic Annihilation of e^+e^- Into Quarkonium States with Even Charge Conjugation // Nucl. Phys. — 1979. — Vol. B157. — P. 125.
111. Kühn J. H. — Proceedings of the International Workshop on e^+e^- collisions from Φ to Ψ , Rome, Italy. — 2013.
112. Ablikim M. et al. An improved limit for Γ_{ee} of X(3872) and Γ_{ee} measurement of $\psi(3686)$ // Phys. Lett. — 2015. — Vol. B749. — P. 414–420. — 1505.02559.
113. Kivel N., Vanderhaeghen M. $\chi_{cJ} \rightarrow e^+e^-$ decays revisited. — 2015. — 1509.07375.
114. Jansen M., Hammer H. W., Jia Y. Finite volume corrections to the binding energy of the X(3872) // Phys. Rev. — 2015. — Vol. D92, no. 11. — P. 114031. — 1505.04099.
115. Baru V., Epelbaum E., Filin A. A., Gegelia J., Nefediev, A. V. Binding energy of the X(3872) at unphysical pion masses // Phys. Rev. — 2015. — Vol. D92. — P. 114016. — 1509.01789.