

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора Физического института

им. П.Н. Лебедева РАН

физико-математических наук

С.Ю. Савинов

2017 г.



### ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертационную работу НЕФЕДЬЕВА АЛЕКСЕЯ ВЛАДИМИРОВИЧА «Пороговые явления и экзотические адроны в непертурбативной КХД», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

#### Актуальность избранной темы

Последнее десятилетие ознаменовалось значительным прогрессом в изучении физики тяжёлых кварковых ароматов. Так, обнаружение в 2003 году состояния X(3872) в спектре чармония и последовавший за ним всплеск активности экспериментальных коллабораций по поиску и изучению других адронных состояний, не вписывающихся в стандартную кварковую модель, послужили толчком к развитию теоретических и феноменологических методов и подходов, призванных описать и объяснить свойства таких экзотических состояний. При этом необходимо констатировать, что, несмотря на многочисленные усилия теоретиков из многих стран, имеет место некоторое отставание теории от эксперимента. Действительно, хотя количество предлагаемых теоретических моделей и построений весьма велико, единообразный подход к описанию экзотических адронов до сих отсутствует. Во многом это обусловлено сложностью поставленной задачи, поскольку в области выше порога рождения открытого аромата простые методы, основанные на потенциальных кварковых моделях и их разнообразных расширениях, или работают недостаточно хорошо, или и вовсе являются неприменимыми. Другой проблемой является сложность обработки экспериментальных данных в указанной области энергий, поскольку околопороговые состояния не могут быть полноценно описаны в терминах привычных параметров, таких как масса и ширина резонанса. В этих условиях теоретики оказываются перед необходимостью обращения непосредственно к экспериментальным данным, что существенно затрудняет их работу, поскольку современные теории и модели сильных взаимодействий достаточно сложны и

обычно оперируют весьма громоздкими выражениями. В этом смысле, крайне полезными представляются любые усилия по унификации описания околопороговых и экзотических состояний в спектре тяжёлых кварков, по построению параметризаций, позволяющих извлекать из экспериментальных данных всю полноту содержащейся в них информации, по модельно-независимому определению из них параметров, корректно описывающих экзотические состояния. Поскольку с развитием методов компьютерного моделирования на решётках в будущем предполагается получение информации об экзотических адронах, по сути, непосредственно из первых принципов сильных взаимодействий так же, как это достаточно рутинно делается сейчас для обычных кваркониев, соотнесение результатов таких вычислений с экспериментом и с предсказаниями теоретических моделей также представляется крайне необходимым и своевременным.

Диссертационная работа посвящена изучению данных, а также смежных с ними вопросов. В частности, в диссертации предлагается унифицированный подход к параметризации и описанию формы линии экзотических околопороговых состояний, а также к интерпретации решёточных данных, как имеющихся на данный момент, так и ожидаемых в будущем. Предложенные в диссертации методы проиллюстрированы на примере обработки данных для наиболее хорошо изученных экспериментально экзотических адронных состояний и демонстрируют свою состоятельность.

Таким образом, актуальность выбранной темы не вызывает сомнения.

### **Научная новизна полученных результатов**

В диссертационной работе получены следующие результаты, несомненно являющиеся новыми:

- Предложена параметризация, позволяющая извлекать из экспериментальных данных параметры околопороговых экзотических состояний в спектре тяжёлых кварков. Полный контроль за унитарностью и аналитичностью на всех этапах обработки данных делает предложенную параметризацию уникальной.
- Установлена природа состояний  $X(3872)$  в спектре чармония, а также состояний  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$  в спектре боттомония на основании анализа данных, проведённого с использованием различных частных случаев предложенной выше параметризации.
- Предложен теоретико-полевой подход к описанию околопороговых резонансов с непертурбативным учётом как короткодействующих, так и дальнедействующих сил, в частности, однопионного обмена. Следует отметить, что имеющиеся в литературе аналоги сводятся к учёту пионов лишь по теории возмущений, так что предложенный в диссертации подход существенно расширяет область применимости метода.
- Аналогично случаю феноменологической параметризации формы линии резонанса, применение предложенного общего теоретико-полевого подхода наглядно проиллюстрировано на примере извлечения параметров  $X(3872)$ ,

как подпорогового пика связанного состояния, и построения киральной экстраполяции его энергии связи по массе лёгкого кварка. Оба результата апеллируют к области энергий и к массам лёгкого кварка, недоступным для непосредственного экспериментального изучения, и потому имеют важное значение для теории.

- Сделаны оценки различных экспериментально изученных или потенциально доступных для изучения свойств состояния  $X(3872)$ . В частности, продемонстрировано отсутствие противоречия между измерениями радиационных мод распада данного состояния и молекулярной моделью последнего.
- Впервые сделана оценка вероятности прямого рождения состояния  $X(3872)$  в  $e^+e^-$  аннигиляции.
- Ряд результатов, полученных и использованных на промежуточных этапах построения параметризации формы линии и киральной экстраполяции энергии связи околопороговых состояний, имеют самостоятельное значение. К числу таких результатов можно отнести детальное исследование взаимного влияния кварковых и адронных степеней свободы в околопороговом резонансе, всестороннее изучение однопионного обмена в  $D\bar{D}^*$  и  $D^*\bar{D}_1$  системах, а также обсуждение на микроскопическом уровне константы связи пиона с возбуждёнными адронами в рамках обобщённой модели Намбу-Иона-Лазинио.

### **Степень обоснованности и достоверности**

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректным применением методов квантовой теории поля, эффективных теорий, различных теоретических и феноменологических подходов (таких как уравнения Дайсона, Липпманна-Швингера, трёхчастичные уравнения Фаддеева, киральная теория возмущений, модель связанных каналов и др.), а также методов численного моделирования.

Обоснованность результатов исследования, проведённого в диссертационной работе, подтверждена их хорошим согласием с имеющимися экспериментальными, решётчными, а также теоретическими результатами ведущих научных групп.

Статьи, вошедшие в диссертационную работу, опубликованы в ведущих мировых научных изданиях, многократно докладывались, в том числе диссертантом лично, на семинарах и конференциях и получили поддержку и одобрение ведущих учёных, работающих в данной области физики сильных взаимодействий. На момент написания отзыва количество цитирований указанных публикаций превышает 600 (по базе inspirehep).

### **Научная и практическая значимость**

Научная значимость диссертационной работы определяется разработанными в ней методами описания свойств экзотических околопороговых состояний в

спектре тяжёлых кварков, а также конкретными результатами, полученными с использованием предложенных методов, которые имеют как теоретическое, так и прикладное значение и, несомненно, найдут непосредственное применение в теоретической и в экспериментальной физике высоких энергий.

Следует отметить плодотворное взаимодействие диссертанта с участниками ведущих экспериментальных коллабораций (Belle, Belle-II, BESIII) и непосредственное применение методов, изложенных в диссертации, к экспериментальным данным, полученным «из первых рук». Подобное сотрудничество особенно важно и своевременное ввиду большого объёма данных, поступающих из уже работающих экспериментов (LHC, BES), а также в преддверии начала работы в ближайшем будущем экспериментов нового поколения (B-фабрики Belle-II, эксперимента Panda в GSI) и ожидаемого большого объёма новых, существенно более точных, данных по экзотическим околопороговым состояниям в спектре тяжёлых кварков.

Предложенный в диссертации комплексный подход к исследованию свойств экзотических околопороговых адронов, содержащих тяжёлые кварки, позволяет проводить модельно-независимую обработку экспериментальных данных для таких состояний, непосредственно извлекать из них параметры околопороговых резонансов, информацию об их природе и свойствах, делать предсказания для ещё не обнаруженных состояний.

Представленный в диссертации метод численного исследования свойств околопороговых состояний с учётом связи каналов и многочастичной динамики позволяет извлекать и изучать достаточно тонкие эффекты и явления в физике околопороговых состояний, не доступные на сегодняшний день для непосредственного экспериментального исследования. Несомненно, по мере дальнейшего совершенствования техники численного моделирования на решётке и поступления со стороны численного эксперимента более точных данных о свойствах экзотических адронов полученные в диссертации результаты также будут весьма востребованы.

Следует отметить, что оценка вероятности прямого рождения состояния  $X(3872)$  в  $e^+e^-$  аннигиляции, сделанная впервые в мировой литературе, а также независимое подтверждение имеющейся в литературе оценки аналогичного прямого рождения истинного чармония  $\chi_{c1}$  непосредственно учитываются коллаборацией BESIII при принятии решения о физической программе эксперимента.

### **Общие замечания по диссертационной работе**

Диссертация состоит из Введения, 5 глав основного текста, Заключение, а также 4 приложений. Основные результаты диссертации изложены в 26 статьях, опубликованных в ведущих мировых реферируемых журналах, входящих в список ВАК, а также в 5 статьях в сборниках трудов конференций и в 8 тезисах докладов.

Содержание диссертации полностью соответствует опубликованным работам. Приближения и предположения, использованные в конкретных расчётах,

должным образом оговорены и представляются адекватными решаемым задачам. Диссертация содержит достаточно подробное и развёрнутое описание современного состояния дел в изучаемой области сильных взаимодействий и места, занимаемого в ней исследованиями, составляющими основу диссертацию. Научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений, основные сделанные в диссертации выводы представляются убедительными. Результаты диссертации являются итогом законченного и должным образом представленного научному сообществу исследования, личный вклад диссертанта в которое также не вызывает сомнения.

Существенных замечаний к изложению материала нет, диссертация написана аккуратно, грамотным научным языком, полученные результаты хорошо проиллюстрированы.

При ознакомлении с диссертацией возникли следующие критические замечания:

1. Используемые феноменологические модели содержат довольно большое число параметров. Обсуждение результатов следовало бы дополнить более подробным анализом их относительной важности.
2. Более подробного обсуждения заслуживает вопрос о надежности результатов в рамках модели Намбу в свете ее неперенормируемости.

Сделанные замечания, однако, не влияют на высокую оценку представленной диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация НЕФЕДЬЕВА А.В. «Пороговые явления и экзотические адроны в непертурбативной КХД» является законченной научно-квалификационной работой. Совокупность выполненных в ней исследований и разработанных теоретических и феноменологических методов и подходов можно квалифицировать как существенное достижение в теоретической физике сильных взаимодействий.

Автореферат диссертации полно и правильно отражает её содержание.

Диссертация доложена и обсуждена на научном семинаре Лаборатории физики высоких энергий ФГБУ науки Физический институт РАН им. П.Н.Лебедева 26 декабря 2016 года. Работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук (пп. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней), а её автор, НЕФЕДЬЕВ Алексей Владимирович, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник  
Лаборатории физики высоких энергий  
ФГБУ науки Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

доктор физико-математических наук,

Леонидов  
Андрей Владимирович

119991, г.Москва, Ленинский проспект, д. 53  
Телефон: +7(499) 783-37-19, E-mail: leonidov@lpi.ru

Зав. лабораторией физики высоких энергий  
ФГБУ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН,  
доктор физико-математических наук

Дремин  
Игорь Михайлович

119991, г.Москва, Ленинский проспект, д. 53  
Телефон: +7(499) 783-37-19, E-mail: dremin@lpi.ru