

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук  
**Николаева Николая Николаевича**  
на диссертационную работу  
**Нефедьева Алексея Владимировича**  
«Пороговые явления и экзотические адроны в непертурбативной КХД»,  
представленную в диссертационный совет Д 201.002.01  
федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«ГНЦ РФ – Институт теоретической и экспериментальной физики»  
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва,  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

### Актуальность темы диссертации:

Я начну с общих вводных замечаний. Для основоположников кварковой модели кварки были скорее всего буквами симметричной азбуки, давшей понятное и компактное описание спектроскопии адронов и соотношений между амплитудами разных реакций. В этом аспекте кварки и унитарная симметрия кардинально отличались от изобарической симметрии в ядерной физике и физике нуклонов, как истинных степеней свободы в ядрах, описываемых как квантовомеханические слабосвязанные состояния нуклонов. С точки зрения господствовавшего к середине 60-х гг дисперсионного подхода, отсутствие отвечающих кваркам особенностей амплитуд, на которое апологеты кварковой модели закрывали глаза, делали кварки (почти) оксюморонами. Это мучило многих авторов, и было немало попыток обосновать дуальность кваркового и адронного описания на языке дисперсионных правил сумм, которые, пусть и на уровне мнемонических правил, имели некий успех для процессов рассеяния при высоких энергиях – тут можно упомянуть серию работ В.В. Анисовича с соавторами из ЛИЯФ/ПИЯФ.

Ситуация изменилась после ноябрьской революции 1974 года, когда в Брукхэйвене и Стенфорде экспериментально открыли уровни чармония. Это были не просто первые однозначно квантовомеханические связанные состояния тяжелого очарованного кварка и антикварка, а вдобавок и количественно описываемые пертурбативным потенциалом одноглюонного обмена из на редкость удачно утвердившейся за год до этого квантовой хромодинамики с её асимптотической свободой. Открытие ещё более тяжелых прелестных кварков и боттомония только укрепило статус этой картины, в которой кварки и антикварки стали узаконенными квантовомеханическими степенями свободы в спектроскопии.

Для меня символично, что диссертационная работа А.В. Нефедьева была выполнена в ИТЭФ, где уже 40 лет тому назад М.В. Волошиным и Л.Б. Окунем обсуждались на полуколичественном уровне молекулярные состояния чармония. В той работе Волошин и Окунь сделали фундаментальный шаг к физике непертурбативных состояний в спектре чармония, намного опередив время и возможности эксперимента.

Мало кто предвидел в полной мере тот расцвет спектроскопии адронов, к которому привели В-фабрики. Благодаря гигантской светимости, В-фабрики, работающие на пике 4S-состояния боттомония, оказались непревзойденной фабрикой состояний как чармония, так и в особенности экзотических состояний с открытым чармом, которые не получалось увидеть на с-фабриках. Были открыты новые состояния и с открытой прелестью. Экзотическими эти состояния делает близость их масс к порогам рождения пар мезонов с чармом или прелестью, т.е., это резонансы в сплошном спектре. Для развития всей физики таких состояний исключительно плодотворными оказались экспериментальные данные с коллайдера BELLE, полученные с важным участием большой команды экспериментаторов из ИТЭФ. Экспериментальные открытия потребовали адекватной теоретической интерпретации новых и в

немалой степени неожиданных результатов. И тут приятно отметить тесное сотрудничество с экспериментаторами из родного института, которое сыграло важную роль в работе диссертанта.

### **Основное положение диссертации и её новизна:**

В квантовомеханической спектроскопии связанных состояний спектр определяется граничными условиями на волновую функцию на малых и больших расстояниях. Диссертационная работа А.В. Нефедьева посвящена в основном спектроскопии состояний в сплошном спектре с массами вблизи порога пар мезонов с открытыми чармом или прелестью. Для таких состояний апелляция к пертурбативной КХД подсказывает следующую интуитивную картину: при подходящих квантовых числах, граничное условие на пертурбативно малых расстояниях следует ставить как для чисто кварк-антикварковых состояний чармония или боттомония с подобающими квантовыми числами, а граничное условие на больших расстояниях, и тем самым масса мезона, будут определяться уже взаимодействием в открытых адронных каналах. Тут определяющим будет уже сильное взаимодействие между мезонами, содержащими легкие кварки или антикварки, которое с неизбежностью будет непертурбативным, так что возникает нетривиальная задача сшивки пертурбативного и непертурбативного режимов. Трудность решения этой задачи объясняет, почему литература по экзотическим мезонам (и барионам) с парами тяжелых кварка и антикварка почти необъятна.

В диссертационной работе А.В. Нефедьева задаче единого описания пертурбативных и непертурбативных аспектов спектроскопии состояний с парами тяжелых кварков дана последовательная формулировка на дисперсионном языке. В рамках предложенного подхода типичная для таких состояний многоканальность сплошного спектра трактуется единым образом с учетом ограничений, которые накладывает условия унитарности и аналитичности, включая специфические тонкости унитаризации в трехчастичных каналах. Именно эта формулировка и её приложения и составляют новое направление, развитое трудами диссертанта.

Перейду теперь к основному содержанию диссертационной работы А.В. Нефедьева, основанной на более чем 30 журнальных публикациях автора с 2003 года (всего за 20 лет работы в теоретической физике высоких энергий им опубликовано более 60 работ в ведущих физических рецензируемых журналах мира).

### **Новизна подхода и основные результаты:**

Введение в предмет диссертации и обзор литературы распределены по частям по пяти главам диссертации. Это не очень удобно, поскольку в заметной степени затрудняет использование диссертации как учебного пособия неподготовленным читателем или студентом. Между тем, эта же задача введения в предмет достаточно хорошо решена в автореферате диссертации на примерно трех с половиной страницах раздела «Степень разработанности темы исследования» – расширенная версия этого раздела украсила бы текст диссертации.

Первая глава диссертации – это очень ясно написанное введение в феноменологию околопороговых состояний. Автор начинает с объяснения роли близости к порогу на ставшем уже классическом примере модификации формы резонансной линии от Брейт-Вигнеровской к формуле Флатте. Диссертант переходит далее к введению в смешивание связанных состояний с открытыми адронными каналами в рамках формализма Вайнберга. Удивительно то, что многие работающие в данной области авторы и, к сожалению, диссертант не исключение, забывают при этом о ключевой в этой тематике работе Ландау «Малые энергии связи в квантовой теории поля» (ЖЭТФ 39 (1960) 1856) – то, что Вайнберг не сослался на эту работу Ландау, опубликованную за три года до него, не может служить оправданием. Далее на 25 страницах разделов 1.7 и 1.8, дано подробное и ясное изложение влияния смешивания кваркового и молекулярного состояний на форму резонансной линии около порога, которая может существенно отличаться от канонической формулы Флатте. Перенормировка массы кваркового состояния смешиванием с молекулярным естественна – аналогия с отмеченным выше влиянием

открытых адронных каналов на граничное условие на больших расстояниях в координатном рассмотрении полная. Основные выводы продемонстрированы на конкретных примерах. Изложение этих результатов в диссертации важно как хороший учебный материал.

Вторая глава диссертации развивает далее предыдущую главу и решает важную задачу построения удобной для анализа экспериментальных данных параметризации формы резонансной линии, в которой последовательно учитываются требования аналитичности и многоканальной унитарности. Последние требования существенны для уменьшения числа свободных параметров. Здесь должным образом отмечаются ранние идеи о роли унитарности, высказанные в ИТЭФ Ю.А. Симоновым с соавторами в рамках сходных задач в ядерной физике и в физике адронов, состоящих из легких кварков. Как важная наглядная иллюстрация полученных результатов, проведен полный анализ данных коллаборации BELLE по заряженным состояниям  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$ . Это уникальный пример почти вырожденных состояний, причем каждое из них близко к своему двухмезонному порогу —  $B\bar{B}^*$  и  $B^*\bar{B}$  соответственно. Еще в 2011 году, сразу после первого сообщения об этих состояниях, М. Волошин с соавторами (А. Бондарь и др.) отметили возможность большого веса молекулярной компоненты в этих частицах. Примечательно, что в этом случае диктуемая КХД спиновая симметрия тяжелых кварков проявляется и в дальнедействующей части волновой функции системы. Не рассматривая затравочные заряженные тетракварки, что является вполне адекватным начальным предположением, диссертант в рамках своей параметризации приводит решения с хорошим доверительным уровнем для чисто молекулярных гипотез. Вывод А.В. Нефедьева, что  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$  следует трактовать как виртуальные уровни, крайне нетривиален – это можно сделать, только обладая формализмом такой полноты, какой предъявлен диссертантом. В заключение этой главы, в разделе 2.6 и в конце раздела 2.7, описаны возможности формализма по предсказанию свойств спиновых партнёров состояний  $Z_b$ , экспериментальная проверка которых на В-фабрике следующего поколения была бы в высшей степени интересной как критический тест идей А.В. Нефедьева. Крайне интересно, как в рамках развитого в работах диссертанта подхода выглядели бы структура нейтрального партнера заряженных  $Z_b$  и картина смешивания изовекторного и изоскалярного состояний – экспериментальное наблюдение таких состояний на В-фабрике следующего поколения вполне реалистично.

В физике адронов из легких кварков резонансы в числе продуктов распада привычно трактуются как стабильные частицы. В случае околопороговых состояний в секторе тяжелых кварков ширина мезонов с открытым чармом или прелестью вполне может оказаться сопоставимой с расстоянием до порога. Эта новая ситуация, когда двух и трехчастичные пороги близки друг к другу, или когда распадный пион близок к массовой поверхности, есть предмет изучения главы III диссертации А.В. Нефедьева. Это не первая постановка вопроса о влиянии на спектр ширины конститuentов: можно вспомнить о  $t$ -кварках или о взаимодействии изобары с нуклонами, т.е. одну из активно обсуждавшихся в ИТЭФ тем Ю.А. Симонова с соавторами. Однако обсуждаемая здесь задача принципиально намного сложнее, чем задача о топонии, в котором ширина  $t$ -кварков превышает наивно оцененное расщепление уровней, так что  $t$ -кварк распадается быстрее, чем вообще успевают образоваться связанные состояния топония. Поучителен разбор ошибочных работ других авторов, которые обмен реальным продуктом распада нестабильного конститuenta подменяли вещественным осциллирующим потенциалом – показано, что такая подмена не согласуется с условием унитарности и приводит к абсурдным результатам. Значимость непертурбативной трехчастичной унитарности хорошо продемонстрирована на примере влияния  $D\bar{D}$  л канала в  $X(3872)$  на форму резонансной линии. В силу малой массы особая роль пиона в трехчастичных каналах очевидна, и диссертант приводит аргументы в пользу убывания связи пиона с ростом массы возбужденного состояния. В основе конкретного вывода этого свойства лежит обобщенная модель Намбу-Йона-Лазинио, но оснований в пользу модельной независимости этого заключения достаточно.

Главу IV диссертации, объемом более 60 страниц, можно назвать настольной книгой изучающего физику  $X(3782)$ . Здесь А.В. Нефедьев применил к изучению свойств  $X(3782)$  всю мощь методов, развитых им и описанных в главе II диссертации. Здесь я остановлюсь лишь на важнейших выводах диссертанта. Во-первых, показано, что веса чисто чармониевой

(псевдовекторной) и молекулярной компоненты  $X(3782)$  примерно одинаковы. Во-вторых, показано, что количественное описание упругого канала делает гипотезу о связанном состоянии в молекулярной компоненте намного предпочтительнее, чем гипотезу о виртуальном состоянии. В-третьих, дана оценка вклада молекулярной компоненты в ширину радиационного распада  $X(3782)$  в два низшие состояния чармония и получено согласие с экспериментальными данными с детектора LHCb в ЦЕРН. В ранних работах утверждалось, что близость ширин двух распадов невозможна при большой примеси молекулярной компоненты. В-четвертых, даны предсказания для рождения  $X(3782)$  и псевдовекторного состояния чармония в электрон-позитронных столкновениях. В-пятых,  $X(3782)$  – это отличный полигон для изучения роли связанных каналов, основанного в трехчастичном секторе на уравнения Фаддеева, и в особенности важной роли однопионного обмена в канале  $D\bar{D}'$ . Сделан важный вывод, что на форму линии  $X(3782)$  существенно влияет подпороговая область, где важен разрез от  $D\bar{D}'$  канала, и что последовательная теория и статическое приближение дают ширины, отличающиеся вдвое. Этот раздел диссертации – отличный задел для трактовки более прецизионных экспериментальных данных с В-фабрик нового поколения.

Важному обобщению трактовки однопионного обмена в разделе IV на т.н. киральные поправки к численному моделированию свойств адронов в решеточной КХД посвящена глава V диссертации. Решаемая А.В. Нефедьевым задача намного полнее, чем обсуждавшаяся ранее задача о киральных поправках к параметрам преимущественно основных состояний адронов в секторе легких кварков. Нужда в таких поправках проистекает из все еще грубых решеток, неадекватных для помещения в них пионов с очень малой физической массой. Автор этого отзыва не разделяет оптимизма энтузиастов решеточного моделирования  $X(3782)$  – в таком моделировании слишком многое зависит от выбора интерполирующих полей, но это ничуть не умаляет важности поднятых в диссертации вопросов. Избежать киральной экстраполяции к физической массе пиона в решеточных расчетах просто невозможно. Нетривиальный аспект такой экстраполяции для  $X(3782)$ , указанный диссертантом, состоит в том, что роль трехчастичного разреза от  $D\bar{D}'$  канала резко меняется в зависимости от массы пиона. Только формализм уровня развитого в диссертации А.В. Нефедьева позволяет полноценным образом проследить аналитическую зависимость от массы пиона, как параметра, и предписать тем самым теоретически обоснованный режим экстраполяции. С другой стороны, интерпретация результатов решеточных расчетов будущего поколения для  $X(3782)$  в формализме диссертанта позволила бы определить свойства адронного взаимодействия в молекулярных системах мезонов с тяжелыми кварками. В-общем, как и предыдущие, эта глава диссертации – важный задел на будущее.

Перейду теперь к более формальной оценке диссертационной работы А.В. Нефедьева.

#### **Достоверность полученных результатов:**

Автор оппонируемой диссертационной работы А.В. Нефедьев – получивший международное признание физик-теоретик, автор более 60 оригинальных работ с хорошей цитируемостью. За достоверность полученных результатов говорит то, что эти работы, в частности, составившие основу диссертации, опубликованы в ведущих реферируемых научных журналах мира, а также согласие с экспериментом в тех случаях, когда экспериментальные данные имеются. У А.В. Нефедьева хорошо развитое международное сотрудничество, он регулярно участвует в международных конференциях с приглашенными докладами.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов:**

Развитый в докторской диссертации А.В. Нефедьева многоканальный формализм открывает путь к последовательному решению большого числа нерешенных ранее задач в спектроскопии околопороговых состояний с парами тяжелых кварков. Он позволяет понять, является ли околопороговое состояние виртуальным или связанным – однозначный ответ на этот вопрос без формализма такой полноты невозможен. Уже полученные диссертантом результаты могут быть использованы для планирования новых экспериментов на В-фабрике нового

поколения, в частности, автором получен ряд новых предсказаний, проверка которых несомненно войдет в экспериментальную программу новой В-фабрики в Цукубе. Созданный формализм ценен своей ориентацией на феноменологию экспериментальных данных, и он уже был успешно использован с этой целью. В целом, А.В. Нефедьевым создано новое направление в спектроскопии частиц с тяжелыми конституэнтами. Пока задета только верхушка айсберга, и подходу А.В. Нефедьева уготованы обширные приложения.

Выше уже были отмечены результаты А.В. Нефедьева, которые могут быть использованы при преподавании курса физики высоких энергий.

#### **Содержание диссертации и её завершенность:**

Все публикации, составившие диссертационную работу А.В. Нефедьева, объединены единым формализмом и единой тематикой. Все результаты диссертации опубликованы в ведущих международных физических журналах. Решения всех задач доведены до уровня, когда результаты могут быть использованы как для решения сходных задач, так и для обработки экспериментальных данных или планирования новых экспериментов.

Мне очень понравилось нестандартное для диссертаций включение «Словаря терминов».

#### **Критические замечания и пожелания:**

Диссертационная работа читалась бы легче, будь она дополнена обстоятельным Введением с историей вопроса и разбором литературы – автореферат диссертации частично помогает в этом. Было бы полезным оформить материал главы I и частично главы II в виде учебного пособия – их педагогическая ценность несомненна. Действительно, эта диссертация убедительно напомнила о силе дисперсионного подхода, а если не считать учебника Бартона почти полувековой давности, то обстоятельных учебников практически нет. Выше было отмечено отсутствие упоминания работы Ландау по малым энергиям связи в теории поля – это в целом непринципиально, но досадно. Это опять же непринципиально, но было бы уместно отметить некоторые аналогии в трактовке однопионного обмена в задаче об X(3872) и в работах М.И. Поликарпова и Ю.А. Симонова о взаимодействии резонансов с нуклонами. Опечатки возможны и в эпоху спеллчекеров, и мне кажется, что в последней строке стр. 203 Шепаньяк было бы правильнее, чем Шпаньяк? Остальные несколько замеченных опечаток недостойны упоминания.

Эти замечания и пожелания никак не умаляют научных достоинств диссертационной работы А.В. Нефедьева.

#### **Оценка автореферата диссертации:**

Автореферат диссертации адекватно отображает её содержание и полученные в диссертации результаты.

#### **Заключение оппонента по диссертации А.В. Нефедьева на соискание ученой степени доктора наук:**

Диссертация Нефедьева Алексея Владимировича «Пороговые явления и экзотические адроны в непертурбативной КХД» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 (теоретическая физика) является научно-квалификационной работой, в которой развито новое направление в теоретической спектроскопии околороговых состояний с тяжелыми конституэнтами, имеющее важное практическое значение как источник нового формализма для теоретического описания и установления природы новых тяжелых мезонов, открытых на В-фабриках, а также для планирования новых экспериментов, в частности, как источник новых предсказаний для проверки на В-фабриках следующего поколения. Часть результатов А.В. Нефедьева могут быть уже сейчас использованы при преподавании физики высоких энергий на физических факультетах университетов.

Диссертационная работа Нефедьева Алексея Владимировича «Пороговые явления и экзотические адроны в непертурбативной КХД» полностью соответствует требованиям п. 9

«Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник

Николаев Николай Николаевич,  
Дата 27.01.2017

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН. Проспект Академика Семёнова, д. 1, г. Черноголовка, 142432 Московская обл., тел. : (+7 495) 702-93-17, nikolaev@itp.ac.ru

Подпись  Николаева заверяю

Ученый секретарь Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау,  
канцелярия физико-математических наук



Крашаков Сергей Александрович,  
Дата 27.01.17