

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **КУЗЬМИНА Александра Степановича** «ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОРБИТАЛЬНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ ОЧАРОВАННЫХ МЕЗОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BELLE», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Одной из целей создания В-фабрик является всестороннее исследование мезонов с ненулевыми квантовыми числами шарма и прелести, к которым относятся соответственно  $D$ - и  $D_S$ -мезоны и  $B$ - и  $B_S$ -мезоны с различными спин-чётностями. Предсказания и описание свойств этих состояний является важным элементом проверки стандартной модели, в основе которой лежит теория электрослабых взаимодействий и квантовая хромодинамика (КХД).

С точки зрения теории, соображения и выводы, основанные на принципах симметрии, играют особую роль в физике элементарных частиц. Они позволяют получать результаты, наименее зависимые от модельных предположений, которые неизбежны при рассмотрении процессов в области низких и промежуточных энергий. КХД как теория сильных взаимодействий, при этих энергиях находится в режиме сильной связи, что делает невозможными расчёты по теории возмущений. По этой причине необходимо построение эффективных теорий, в основе которых лежит определённая симметрия, как правило, приближённая. Одной из таких теорий, созданной для описания реакций и распадов  $D$ -мезонов с ненулевым квантовым числом шарма и  $B$ -мезонов с ненулевой прелестью, явилась эффективная теория тяжёлого кварка (ЭТТК). В основе ЭТТК лежит приближённая спин-флэйворная симметрия фундаментального лагранжиана КХД, возникающая в пределе бесконечной массы тяжёлого кварка.  $D$ - и  $B$ -мезоны с различными спин-чётностями принадлежат определённым мультиплетам этой симметрии, что и позволяет делать заключения о распадных свойствах этих частиц. Как и любая эффективная теория, ЭТТК содержит неизвестные параметры или даже функции, в данном случае функции Исура – Вайса, которые необходимо извлекать из экспериментальных данных.

В секторе  $D$ -мезонов есть особый класс состояний  $D_0^*$ ,  $D_1'$  и  $D_1$ ,  $D_2^*$ , состоящих из тяжёлого  $c$ -кварка и лёгких антикварков  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$  и имеющих положительную пространственную чётность, называемых орбитальными возбуждениями, далее обозначаемыми как  $D^{**}$ . В рамках ЭТТК первая группа состояний принадлежит мультиплету с полным угловым моментом лёгкого кварка  $j_q = \frac{1}{2}$  и имеет большие ширины, тогда как для второй группы  $j_q = \frac{3}{2}$ , адронный распад идёт в  $D$ -волне, поэтому эти резонансные состояния узкие.

Аналогичные состояния возможны и для мезонов семейства  $D_s$  с различными спин-чётностями, в которых лёгкая подсистема содержит странный антикварк  $\bar{s}$ . Предпринятое в диссертации исследование орбитальных возбуждений в мезонах типа  $c\bar{q}$  в конечных состояниях нелептонных распадов  $\bar{B}$ -мезонов позволяет проверить такие важные ингредиенты стандартной модели как элементы матрицы Кобаяши-Маскава и основанные на КХД эффективные теории, призванные описывать чисто адронные процессы при низких и промежуточных энергиях. Поэтому **актуальность темы** докторской диссертации А.С. Кузьмина, посвящённой изучению этих состояний, не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста и заключения. Список литературы содержит 254 наименования. Основные физические результаты, полученные в диссертации, изложены в третьей и четвёртой главах, тогда как «аппаратная часть» результатов описана во второй и пятой главах.

Во **введении** дан обзор физики мезонов, состоящих из тяжёлого и лёгкого кварков и имеющих положительную пространственную чётность. Обзор включает как перечень основных теоретических моделей, призванных описать спектроскопию и распадные свойства этих частиц, так и обзор экспериментов в этой области. Здесь же выделены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

**Глава 1** посвящена подробному рассмотрению свойств  $D^{**}$ -мезонов в рамках популярной эффективной теории тяжёлого кварка. Дано краткое обсуждение механизмов рождения этих мезонов в  $e^+e^-$ -аннигиляции и в распадах  $B$ -мезонов. Приведённые в этой главе таблицы с имеющимися теоретическими предсказаниями и их сравнением с многочисленными экспериментальными данными позволяют прочувствовать необходимость получения новой дополнительной информации о  $D^{**}$ -мезонах.

В **главе 2** диссертации описаны коллайдер КЕКВ и детектор Belle, где были получены данные, положенные в основу диссертации. Указаны и подробно освещены те элементы детектора (в частности, основной электромагнитный калориметр) в создание и отладку которых внёс вклад диссертант.

**Глава 3** содержит результаты исследования свойств  $D^{**}$ -мезонов в распадах  $B$ -мезонов. В разделе 3.1 изложены результаты по исследованию ранее не наблюдавшегося распада  $B^- \rightarrow D^+ \pi^- \pi^-$  и изучению его динамики. Амплитудный анализ был проведён в рамках широко применяемой изобарной модели, в которой амплитуда распада аппроксимируется суммой брейт-вигнеровских вкладов возможных резонансных состояний. В результате были выделены состояния  $D_0^{*0}$  с  $J^P = 0^+$  и  $D_2^{*0}$  с  $J^P = 2^+$  и определены их массы, ширины и важные для адронной спектроскопии произведения парциальных вероятностей. Аналогичная работа проведена и в отношении распада  $B^- \rightarrow D^{*+} \pi^- \pi^-$  (раздел 3.2). В результате скрупулёзного анализа амплитуд и фаз различных вкладов в амплитуду этого процесса были выделены резонансные

вклады аксиально-векторных мезонов  $D_1^{0'}$  и  $D_1^0$  и определены их массы и ширины. Оказалось, что в каждой из указанных пар мезонов первый резонанс широкий, а второй узкий. Это является качественным подтверждением предсказаний ЭТТК, согласно которой  $D_0^{*0}$  и  $D_1^{0'}$  принадлежат мультиплету с полным моментом  $j = \frac{1}{2}$  лёгкого антикварка и испускают пион в  $s$ -волне, тогда как для мезонов  $D_2^{*0}$  и  $D_1^0$  имеем  $= \frac{3}{2}$ , и пион испускается в  $d$ -волне. В последнем случае малый импульс пиона входит в пятой степени, что и приводит к малой парциальной ширине. В разделе 3.3 диссертации описаны результаты по поиску трёхчастичного распада  $D^{**} \rightarrow D^* \pi \pi$ . Включение этой моды позволяет выйти за рамки обычно предполагаемых двухчастичных мод и получить ценную информацию для физики состояний типа  $Q\bar{q}$ . Зарядово-спряжённые моды  $\bar{B}^0 \rightarrow D^0 \pi^+ \pi^-$  и  $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*0} \pi^+ \pi^-$  рассмотрены в разделе 3.4. Амплитудный анализ в данном случае более сложен, поскольку пионная пара в конечном состоянии может рождаться из скалярных, векторных и тензорных резонансов. Тем не менее, автору удалось этот анализ провести и извлечь из него произведения парциальных отношений для конечных состояний, в которых эти резонансы присутствуют. Более того, удалось даже получить информацию об амплитудах конкретных поляризационных состояний лёгких промежуточных векторных и тензорных мезонов.

**Глава 4** диссертации содержит результаты исследования мезонов  $D_s^{**}$  с ненулевыми квантовыми числами шарма и странности и с положительной пространственной чётностью. Эти мезоны необычны в том отношении, что не укладываются в схему двухкварковой модели, предсказывающей для них массы существенно больше наблюдаемых. Данные странно-очарованные состояния наблюдались в распадах  $B$ -мезонов в модах  $B^+ \rightarrow \bar{D}^0 D_{sJ}^+(2317)[D_s^+ \pi^0]$ ,  $B^+ \rightarrow \bar{D}^0 D_{sJ}^+(2457)[D_s^{*+} \pi^0]$  и  $B^+ \rightarrow \bar{D}^0 D_{sJ}^+(2457)[D_s^+ \gamma]$  в сочетании с сопряжёнными по проекции изоспина каналами  $B^0 \rightarrow D^- D_{sJ}^+$ . Исследование углового распределения в распаде  $D_{sJ}^+(2457) \rightarrow D_s^+ \gamma$  позволило установить квантовые числа  $J^P = 1^+$  этого мезона. Аналогичное исследование для распада  $D_{sJ}(2317) \rightarrow D_s \pi^0$  свидетельствует в пользу гипотезы  $J^P = 0^+$  для распадающегося мезона.

Конкретные результаты по исследованию орбитальных возбуждений очарованных и странно-очарованных мезонов, представленные в главах 3 и 4 диссертации показывают, что имеющейся статистики не достаточно для выяснения тонких деталей механизмов их распада, необходимых для проверки теоретических моделей. Планируемое более чем на порядок увеличение светимости коллайдера КЕКВ для его превращения в суперКЕКВ-фабрику по производству  $B$ -мезонов призвано, в частности, заполнить и этот пробел в физике адронов. Это потребовало модернизации детектора Belle до Belle II, необходимой для адаптации к увеличенной светимости. В сферу ответственности автора диссертации входила задача по модернизации такого важного элемента

детектора как калориметр. Результаты этой работы подробно изложены в **главе 5** диссертации, где подробно описаны модернизированные элементы конструкции, считывающая электроника и системы их тестирования. Результаты тестирования подтвердили надёжность новых систем калориметра в условиях резко возросшего потока регистрируемых фотонов.

**В заключении** дан перечень основных результатов, полученных в диссертации.

Результаты, полученные в диссертационной работе А.С. Кузьмина, предоставили ценную информацию о нелептонных распадах  $B$ -мезонов в конечные состояния, содержащие орбитальные возбуждения очарованных мезонов, и об адронных модах распада этих интересных состояний. Многие из этих мод распада были измерены впервые, что подтверждает **научную новизну диссертации**. Экспериментальные данные по конкретным парциальным отношениям, приведённые в диссертации, в значительной степени определяют содержание соответствующих разделов Обзора физики частиц (Review of Particle Physics), который издаётся раз в два года авторитетным международным коллективом Particle Data Group. Они используются в теоретических работах, посвящённых построению динамических моделей распадов очарованных частиц. Это обуславливает **научную ценность диссертации**. Заметим также, что обзор физики мезонов, состоящих из тяжёлого и лёгкого кварков, данный в главе 1 диссертации, может служить материалом к спецкурсу для студентов соответствующих специальностей. **Практическая ценность** «аппаратной» части диссертации состоит в том, что созданный при непосредственном участии автора такой важный элемент использованного при измерениях детектора Belle (и модернизированного детектора Belle II) как калориметр, сыграл и сыграет роль при изучении и других процессов (в частности,  $CP$ -несохранения), важных для всесторонней проверки Стандартной Модели физики элементарных частиц.

**Обоснованность научных положений** диссертации не вызывает сомнений, поскольку при анализе данных экспериментов использовались надёжные методы и результаты экспериментальной и теоретической физики элементарных частиц. **Достоверность полученных результатов** подтверждается тем, что исследовались различные модельные предположения и проверялась устойчивость полученных результатов при изменении этих предположений. В тех случаях, когда имеются независимые результаты, полученные на других установках, сравнение результатами рецензируемой работы не выявляет противоречий. Многопараметрические фиты экспериментальных данных скрупулёзно исследовались на предмет нахождения истинного, а не локального минимума функции правдоподобия.

Текст диссертационной работы оставляет приятное впечатление, поскольку даны необходимые формулы для амплитуд процессов. Приведённые таблицы позволяют оценить качество подгонок экспериментальных данных в рамках

различных модельных предположений. Рисунки в on-line версии диссертации (и автореферата) выполнены в цвете. Из недостатков можно указать лишь опisku в знаке мнимой части пропагаторов в формулах (3.22), (3.26), (3.27), (3.29), (3.34) и (3.39) [который должен быть таким, как в формуле (3.43)], и странное значение массы  $s\bar{s}$ -состояния в третьей строке снизу на стр. 25. Изучение автореферата диссертации показало, что он правильно отражает основные её положения.

Учитывая актуальность избранной темы, обоснованность основных научных положений диссертации, новизну и достоверность полученных результатов, их своевременную публикацию в ведущих рецензируемых международных журналах (Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. D и т.п.) можно заключить, что диссертация **А.С. Кузьмина** «Исследование свойств орбитальных возбуждений очарованных мезонов в эксперименте Belle», представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, является законченным трудом, в котором на основании выполненных автором экспериментов и их анализа внесён значительный вклад в решение научной проблемы в области спектроскопии мезонных резонансов, состоящих из тяжёлого и лёгкого кварков и в выяснение деталей их динамики, что имеет важное значение для физики элементарных частиц. Работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор **Александр Степанович Кузьмин** заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент доктор  
физико-математических наук

Аркадий Алексеевич Кожевников

ведущий научный сотрудник лаборатории  
теоретической физики ФГБУН «Институт  
математики им. С.Л. Соболева СО РАН»,  
адрес: 630090, Новосибирск, пр. акад. Коптюга, 4  
тел.: +7383 329 75 19  
e-mail: [kozhev@math.nsc.ru](mailto:kozhev@math.nsc.ru)

09.12.2015

Подпись А.А. Кожевникова удостоверяю.  
Учёный секретарь ИМ СО РАН  
кандидат физико-математических наук



А.Ф. Воронин