

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу
Гармаша Алексея Юрьевича
“Изучение боттомониеподобных состояний в эксперименте Belle”,
представленную на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.16 — Физика атомного ядра и элементарных частиц

1. Актуальность темы диссертации

В рамках Стандартной модели прелестный кварк входит в третье поколение и представляет собой уникальный объект. С одной стороны, он живёт достаточно долго для того, чтобы образовывать связанные состояния — адроны, доступные для экспериментального изучения. С другой стороны, он является достаточно тяжёлым по сравнению со стандартным масштабом КХД Λ_{QCD} , что заметно упрощает теоретическое описание экспериментальных данных, поскольку в системе присутствует малый параметр ($\Lambda_{\text{QCD}}/m_b \approx 0.06 \ll 1$), по которому может вестись разложение, и который обуславливает наличие приближённых, но выполняющихся с хорошей точностью симметрий, например, симметрии спина тяжёлого кварка. Ещё более тяжёлый топ кварк оказывается уже слишком короткоживущим для образования спектроскопии, тогда как более лёгкий очарованный кварк, хотя также входит в состав долгоживущих адронов, изучаемых на эксперименте, однако его приблизительно в три раза меньшая масса по сравнению с массой прелестного кварка ($\Lambda_{\text{QCD}}/m_c \approx 0.2$) несколько снижает точность упомянутых выше приближений и симметрий, порой сводя их к весьма полезным, однако лишь качественным соображениям. Таким образом, как экспериментальное, так и теоретическое исследование состояний боттомония (адронов, содержащих в своём составе прелестный кварк) является важной задачей физики высоких энергий. Следует отметить, что проявившийся в последнее время особый интерес к спектроскопии адронов, содержащих тяжёлые кварки, обусловлен большим количеством новых экспериментальных данных, для теоретического описания которых необходимо привлекать модели и подходы, существенно выходящие за рамки кварковой модели, а также её простых расширений. Действительно, до 2003 года, когда коллаборацией Belle было обнаружено состояние $X(3872)$ в спектре чармония, спектроскопия тяжёлых кваркониев представлялась довольно рутинным занятием: адекватные предсказания для низколежащих состояний в спектре можно было получить уже в рамках простейшей перелятивистской потенциальной кварковой модели, тогда как для описания возбуждённых состояний, как тогда представлялось, достаточно лишь в нужной степени “релятивизовать” модель, т.е. учесть релятивистские поправки. Однако, экспериментально обнаруженные необычные свойства состояния $X(3872)$ наглядно продемонстрировали важность учёта пороговых явлений, эффектов унитаризации, связи каналов, а также рассмотрения более сложного кваркового состава состояния, т.е. всего того, что не может быть надёжно учтено в рамках кварковых моделей. Соответствующие адронные состояния, свойства которых требуют полноценного учёта вышеупомянутых явлений, принято называть чармониеподобными, если они содержат очарованный кварк, или

боттомониеподобными, если в их составе имеется прелестный кварк. Все такие состояния принято также называть экзотическими, таким образом противопоставляя их “обычным” адронам, т.е. кварк-антикварковым мезонам и трёхкварковым барионам. Важно также отметить лидирующую роль эксперимента Belle в исследовании и установлении свойств таких состояний, поскольку другие ускорительные эксперименты, работавшие в прошлом или работающие в мире в настоящий момент, часто не имеют возможности или набирать данные при требуемых энергиях, или вычленять достаточно чистый сигнал в требуемых каналах реакции. В этом смысле значение эксперимента Belle на электрон-позитронном коллайдере для спектроскопии экзотических боттомониеподобных состояний трудно переоценить. Именно изучению ярких (и в настоящий момент единственных обнаруженных экспериментально) представителей семейства экзотических состояний в спектре прелестного кварка и посвящена данная диссертация, поэтому актуальность и своевременность данного исследования не вызывают сомнений.

2. Структура и содержание диссертации

Диссертация содержит вводную часть, шесть глав и заключение.

В введении приведены основные сведения о цели исследования, а также об основных формальных показателях диссертации: её объёме и структуре, личном вкладе докторанта и положениях, выносимых на защиту.

Первая глава посвящена спектроскопии тяжёлого кваркония и содержит краткие сведения о вычислениях на решётках, а также в рамках кварковых моделей и эффективных подходов. Далее в общих чертах обсуждаются экзотические состояния в спектре чармония и мотивация к поиску аналогичных состояний в спектре боттомония.

Вторая глава содержит необходимые сведения об экспериментальной установке — об ускорительном комплексе КЕКБ и детекторе Belle. Данная часть диссертации необходима, в частности, для понимания содержащихся в последующих частях работы оценок различного рода неопределённостей и ошибок.

Начиная с третьей главы, автор излагает основные результаты своей работы. Изложение следует хронологии исследований, проводившихся в эксперименте Belle, начиная с 2006 года, когда энергия электрон-позитронных пучков была поднята до значений, достаточных для проведения измерений в области состояний $\Upsilon(10860)$ и $\Upsilon(11020)$. Данный момент без преувеличения можно считать поворотным в истории исследований боттомониеподобных адронов. В главе 3 подробно изложены результаты исследования процессов двухпционных переходов из $\Upsilon(10860)$ в более низколежащие векторные боттомонии $\Upsilon(nS)$ ($n = 1, 2, 3$), а также в аксиально векторные состояния $h_b(mP)$ ($m = 1, 2$). Важнейшим результатом проведённого исследования стало обнаружение боттомониеподобных состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$, возникающих на промежуточных стадиях указанных реакций, а также извлечение их параметров (масс и ширин). Подробное изложение вопросов, связанных с использованными статистическими методами, детали проведённого амплитудного анализа, оценки погрешностей создают устойчивое впечатление полностью законченной оригинальной работы, результаты которой не вызывают сомнений

в их достоверности. Полученные результаты для параметров состояний Z_b , сечений e^+e^- аннигиляции в различные конечные состояния со скрытой прелестью, парциальные ширины и прочее приведены в виде графиков и таблиц, что очень удобно для восприятия материала.

Глава 4 продолжает тему исследования состояний Z_b , на этот раз в каналах распада $\Upsilon(10860)$ с открытым ароматом, т.е. в конечных состояниях $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}\pi$. В этой главе используется тот же стиль изложения, что и в Главе 3, основные результаты исследования также представлены в виде графиков и сводных таблиц, которые весьма содержательны и информативны. Основным результатом изучения данных распадов $\Upsilon(10860)$ является обнаружение в них тех же состояний Z_b и независимое извлечение их параметров, которые оказываются совместимыми с параметрами, ранее извлечёнными из двухпионных переходов. Таким образом, в диссертации описана уникальная ситуация, в которой два экзотических состояния, расположенных вблизи двух различных порогов рождения открытой прелести, обнаружены одновременно в переходах из векторного боттомония $\Upsilon(10860)$ в семь различных конечных состояний. Значение этих результатов для адронной физики тяжёлых кварковых ароматов трудно переоценить, поскольку для экспериментальной физики высоких энергий они открывают новое направление исследований на электрон-позитронных коллайдерах, а для теоретической физики накопленный экспериментальный материал позволяет строить и с хорошей точностью проверять различные теоретические модели состояний Z_b и далее с их помощью делать новые предсказания для ещё не открытых боттомониеподобных адронов, таких как спиновые партнёры W_{bJ} ($J = 0, 1, 2$).

Пятая глава диссертации содержит обсуждение различных идей, предложенных для описания природы и измеренных свойств состояний Z_b . С достаточной степенью подробности излагаются основные модели, предложенные в литературе, такие как модель компактного тетракварка, модель адронной молекулы, модель адрокваркония и др. Изложение материала в данной главе достаточно полно передаёт современное состояние теоретической мысли в рамках попыток построения единообразного подхода к описанию экзотических адронов, содержащих тяжёлые кварки.

В Главе 6 содержится краткое обсуждение полученных результатов, сравнение с аналогичными результатами, полученными ранее для чармониеподобных систем, обсуждаются перспективы дальнейших исследований системы боттомония и поиска новых боттомониеподобных экзотических адронов. Замечу, что в середине осени 2021 года, т.е. когда данная диссертационная работа была уже закончена, коллаборацией BES III было обнаружено состояние $Z_{cs}(3982)$, которое также хорошо укладывается в молекулярную схему и, возможно, является аналогом чармониеподобных состояний Z_c при расширении ароматической группы лёгких кварков с $SU(2)$ до $SU(3)$. Возможность существования аналогичных странных состояний Z_{bs} в спектре боттомония кратко упоминается в диссертации, однако делается неутешительный вывод относительно невозможности их экспериментального наблюдения в эксперименте Belle II из-за необходимости набора достаточно большой статистики при энергиях выше 11.2 ГэВ, что противоречит имеющимся в настоящее время ограничениям по энергии.

Краткая сводка основных полученных результатов содержится в заключительной части диссертации.

Диссертация производит хорошее впечатление, она написана простым и понятным языком, содержит всю необходимую для понимания информацию, её различные разделы логически связаны между собой. Таблицы и рисунки информативны и наглядно отражают все необходимые сведения.

3. Научная новизна исследования

Диссидентом впервые изучены экзотические состояния в спектре боттомония. В частности,

- разработана и впервые применена процедура исследования амплитуд многочастичных распадов адронов в многомерном фазовом пространстве на основе метода максимального правдоподобия;
- для переходов из состояния боттомония $\Upsilon(10860)$, рождающегося в электрон-позитронной аннигиляции, получены следующие результаты:
 - для двухпионных распадов в $\Upsilon(nS)\pi\pi$ ($n = 1, 2, 3$) с заряженными пионами впервые проведён амплитудный анализ, идентифицированы промежуточные квазидвухчастичные состояния и получены оценки их вкладов;
 - для двухпионных переходов в $\Upsilon(nS)\pi\pi$ с нейтральными пионами впервые получен нетривиальный сигнал и измерено сечение;
 - для переходов в состояния с открытым очарованием $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}\pi$ разработана методика частичной реконструкции конечного состояния, впервые сделано наблюдение статистически значимого сигнала и измерены соответствующие сечения;
- построена феноменологическая модель переходов из состояния боттомония $\Upsilon(10860)$ через образование на промежуточных этапах реакции экзотических состояний боттомония $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$;
- впервые проведено измерение параметров (масс, ширин, квантовых чисел) состояний боттомония $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$.

Таким образом, результаты, полученные в диссертации, позволили открыть новое направление экспериментальных исследований — физику экзотических состояний боттомония.

4. Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и заключений диссертации

Достоверность полученных результатов гарантируется корректной постановкой задачи и использованием адекватных методов её решения, полностью отвечающих сформулированным

целям работы. Исследование основано на экспериментальных результатах, полученных с использованием современного оборудования высочайшего класса, прошедшего многократные проверки и используемого большим числом специалистов в мире. Применяемые методы являются современными, многократно апробированными и хорошо себя зарекомендовавшими. Корректные оценки неопределённостей позволяют утверждать достоверность и высокую статистическую значимость обнаруженных и изученных эффектов. Результаты, представленные в диссертации, были многократно доложены на ведущих научных конференциях и рабочих совещаниях, они хорошо известны в мире, имеют высокий уровень цитирования и используются в большом числе работ, опубликованных во многих рецензируемых научных изданиях.

5. Вопросы и замечания

В заключение хотелось бы сформулировать несколько вопросов к диссертации и сделать несколько замечаний критического характера.

- Ключевой особенностью изучаемых в диссертации состояний является их расположение в спектре выше порога рождения открытого аромата. При обсуждении данного вопроса (например, в вводном разделе 1.2) стоило бы более чётко подчеркнуть важность расположения изучаемого состояния выше самого низколежащего S -волнового порога именно в канапле с данными квантовыми числами, который, соответственно, далеко не всегда совпадает с самым низколежащим порогом открытого аромата $D\bar{D}$ или $B\bar{B}$. Данный вопрос корректно прокомментирован на стр. 9 на частном примере состояния $\psi_2(1D)$, не распадающегося в конечное состояние $D\bar{D}$, однако в тексте диссертации было бы уместно явно сформулировать более общее утверждение на этот счёт.
- В описании теоретических подходов присутствуют некоторые неточности, которые, впрочем, встречаются в литературе довольно часто. В частности, разделение теоретических моделей по числу конституентов на модель тетракварков, молекулярную модель, а также модель адрочармония не вполне корректно, поскольку с точки зрения кваркового состава все указанные состояния являются четырёхкварковыми (содержат в своём составе два кварка и два антикварка). Различие состоит в том, как кварки сгруппированы внутри адрона. По своей сути данный вопрос изложен в диссертации правильно, однако терминологически присутствует некоторая путаница, поскольку состояния, на которые диссертант ссылается как на “тетракварковые” или “четырёхкварковые”, противопоставляя их “молекулярным” (например, на стр. 123 при перечислении групп моделей), более правильно называть “компактными тетракварками”, причём дикварк-антидикварковая картина (как обсуждается, например, на стр. 127) для таких состояний является лишь приближением, которое действительно часто используется в литературе, но, строго говоря, в каждом случае требует обоснования, поскольку изначально никакой кластеризации внутри компактных тетракварков не предполагается — для неё требуются дополнительные динамические причины.

- При описании молекулярной модели на стр. 125 утверждается, что описание пика в надпороговой области представляет для неё трудности. Данное утверждение не совсем верно, поскольку само понятие “молекулярная модель” является весьма широким. Полюс в надпороговой области нельзя получить только при самой простой форме взаимодействия между конституентами, описываемого лишь короткодействующим потенциалом. Добавление к потенциальному энергетической зависимости (например, в результате перехода от лидирующего порядка кирального разложения к следующему за ним порядку) или введение в потенциал адронных обменов (например, пионного) решают данную проблему. Соответствующие подгонки данных и теоретические предсказания формы линии известны в литературе.
- Начало раздела 3.2 (стр. 51) выглядит не совсем понятным. С одной стороны, делается утверждение об отсутствии “общепринятого метода описания амплитуды трехчастичных распадов”. Однако уже в следующей фразе даётся ссылка к ограничениям некоторого конкретного подхода. Требуются пояснения, что имеется ввиду.
- Повсеместно при рассмотрении процессов, содержащих различные вклады, амплитуда записывается в виде суммы слагаемых. Такой вид амплитуды, вообще говоря, нарушает унитарность. И хотя в полной амплитуде такое нарушение может частично компенсироваться введёнными относительными фазами, интерпретация полученного результата представляется затруднительной. В частности, оценки величины различных вкладов в вероятность какого-либо рассматриваемого процесса (см., например, таблицу 17 на стр. 100) традиционно получаются простым отключением ряда вкладов в сумме амплитуд, так что универсальность таких оценок вызывает сомнения. В том числе потому, что при построении полной унитарной амплитуды процесса такое разделение вкладов не представляется возможным в принципе. Это замечание не следует считать критикой данной конкретной диссертационной работы, поскольку ввиду отсутствия альтернатив описанный выше метод рутинно применяется всеми экспериментальными коллаборациями. Тем не менее, хотелось бы лишний раз привлечь внимание к данной проблеме и пригласить экспериментальное сообщество к выработке модельно независимых методов разделения вкладов, которые не нарушили бы унитарности и, что даже важнее, были бы одинаково применимы как в экспериментальном, так и в теоретическом анализе данных. Только в этом случае соотнесение измерений и предсказаний будет иметь практическую пользу не только на качественном, но и на количественном уровне.
- Хотелось бы отметить присутствие в диссертации качественных оценок возможностей эксперимента Belle II по дальнейшему изучению экзотических боттомониеподобных состояний. Несмотря на то, что они не имеют непосредственного отношения к предмету диссертации, такие оценки, полученные из первых рук, т.е. сделанные непосредственным участником экспериментов Belle и Belle II — автором анализа данных по состояниям Z_b ,

весьма полезны и своевременны. Как видно из данных, представленных в диссертации, особый интерес вызывает, в частности, форма линии в канале $B\bar{B}^*\pi$ в области масс вблизи порога $B^*\bar{B}^*$. Утверждается отсутствие статистически значимого сигнала в этой области, что в принципе не противоречит теоретическим построениям, однако требует или использования плохо обоснованных теоретических концепций (типа введения симметрии спина лёгкого кварка), или весьма тонкой подстройки параметров теории. Был бы очень полезен комментарий относительно возможности дальнейшего более точного исследования этой области масс как с использованием уже набранных данных Belle, так и перспектив, которые мог бы предоставить уже работающий эксперимент Belle II.

- При чтении диссертации было обнаружено некоторое количество опечаток и неточностей, что, к сожалению, неизбежно при подготовке материала такого объёма. Подавляющее большинство из них вполне безобидны (например, использование разных обозначений 2γ и $\gamma\gamma$ в двух соседних строчных формулах на стр. 17), однако некоторые могут затруднить восприятие и понимание материала при чтении. Например, на стр. 4, 5 и некоторых других отсутствуют чёрточки над знаками античастиц ($B\bar{B}$ вместо $B\bar{B}$ и т.п.); во втором абзаце на стр. 25 явно пропущены символы $c\bar{c}$ (по-видимому, это связано со случайно заменой латинских букв “с” русской буквой “с”, игнорируемой LaTeX-ом в формулах); на стр. 27 и 49 отношение Λ_{QCD}/m_B приведено несколько по-разному: 0.05 в одном случае и 0.10 в другом, что не совсем понятно, учитывая точность до второго знака после запятой, принятой в обеих оценках; на стр. 69 в подписи к рис. 3.5 вместо ссылки на ненумерованную формулу с той же страницы дана ссылка на раздел 3.3.2; в пункте 5 на стр. 125 пропущен важный для понимания штрих у Z_b в строчной формуле $Z'_b \rightarrow \bar{B}B^*$. В разделе 1.3.1 следовало бы явно оговорить, что речь идёт о тяжёлых кваркониях, содержащих кварк и антiquark одного аромата, когда кварконий обладает определённой зарядовой чётностью. Это утверждение вполне считывается из контекста, однако его следовало бы сделать явно. В противном случае (например, для тяжёлого кваркония $b\bar{c}$) формула (1.3) неприменима. Здесь же отмечу немотивированное использование в некоторых местах диссертации англичизмов, например, слова “брэнчинг” вместо вполне устоявшегося и употребимого термина “парциальная вероятность”. Впрочем, использование подобных заимствований не носит в диссертации массового характера.

Следует отметить, что указанные замечания и недостатки не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы как законченного научного исследования, результаты которого можно квалифицировать как крупное научное достижение. Оно вносит существенный вклад в развитие такой современной и актуальной области экспериментальной физики высоких энергий как спектроскопия адронных состояний, содержащих тяжёлые кварки. Важность проведённых исследований для теории и феноменологии сильных взаимодействия также трудно переоценить.

6. Заключение

Резюмируя, можно утверждать, что тема диссертации актуальна, научные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, полностью обоснованы, достоверность и новизна результатов диссертации, а также личный вклад диссертанта не вызывают сомнений. Все основные результаты, изложенные в диссертации, своевременно опубликованы в ведущих научных журналах и неоднократно доложены на научных семинарах, а также международных конференциях и рабочих совещаниях. Литература цитируется корректно и в полном объёме. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям и установленным Положением о присуждении ученых степеней (в частности, п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней"), а её автор, Гармаш Алексей Юрьевич, без сомнения заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 — Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Я, Нефедьев Алексей Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Гармаша Алексея Юрьевича и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук (специальность 01.04.02),
высококвалифицированный ведущий научный сотрудник
Лаборатории тяжёлых夸克ов и лептонов
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук
адрес: 119991, ГСП-1, Москва,
Ленинский проспект, д.53,
телефон: +7(495)668-88-88 доб. 60-61
эл.почта: nefediev@lebedev.ru

Нефедьев Алексей Владимирович

09.03.2022

Подпись Нефедьева А.В. заверяю



Учёный секретарь ФИАН
к.ф.-м.н. Колобов Андрей Владимирович