

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Гармаша Алексея Юрьевича
**«ИЗУЧЕНИЕ БОТТОМОНИЕПОДОБНЫХ СОСТОЯНИЙ
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BELLE»,**

представленную на соискание ученой степени доктора физико—математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертационная работа Гармаша А.Ю. посвящена актуальной проблеме обнаружения и изучения боттомониеподобных состояний в процессах аннигиляции электрон-позитронных пар в эксперименте Belle.

Спектроскопия тяжелого кваркония является одной из наиболее актуальных тем современной физики адронов, так как задача описания свойств адронов, исходя из первых принципов квантовой теории поля или любого другого теоретического подхода, до сих пор не решена. Определенные успехи на этом пути достигнуты с помощью использования эффективных теорий и феноменологических моделей, а также в рамках решеточной модели квантовой хромодинамики. Открытие в 2003 г. резонансного состояния $X(3872)$ ознаменовало начало этапа изучения экзотических кваркониеподобных состояний с неожиданными свойствами. Сильно возбужденные кваркониеподобные состояния не вписываются в традиционную схему системы кварк-антикварк, и к настоящему моменту общее теоретическое описание отсутствует. Определенный свет на эту ситуацию может пролить новая экспериментальная информация о закономерностях рождения состояний уже известных, а также обнаружение новых кваркониеподобных состояний.

История экспериментального обнаружения и изучения состояний боттомония насчитывает более четырех десятков лет, от первого наблюдения боттомония в 1977 г. в лаборатории FNAL (США) группой Л. Ледермана до исследовательских программ по В-физике и кваркониям экспериментов на Большом адронном коллайдере – LHC (ATLAS, CMS, LHCb). Особое место в этом ряду занимает эксперимент Belle, который благодаря рекордной светимости коллайдера KEKB накопил уникальную статистику данных по рождению состояний $\Upsilon(nS)$, что привело к открытию в 2011 г. первых боттомониеподобных состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$. Кроме того, уникальные электрон-позитронные пучки обуславливают достаточно низкий фон, что позволяет проводить прецизионные измерения свойств боттомония и боттомониеподобных состояний.

В основу исследований, представленных в диссертации, легли данные эксперимента Belle, полученные в период с 1999 по 2010 годы при энергии в системе центра масс вблизи резонанса $\Upsilon(5S)$ $\sqrt{s} = 10.866$ ГэВ на статистике, соответствующей интегральной светимости 121.4 фн^{-1} . Уникальность данных и экспериментальной установки во многом определяет новизну проведенных исследований. Исследования, описанные в диссертации, проводились с использованием современных методов физики высоких энергий и современных теоретических моделей. Актуальность этих исследований не вызывает сомнений.

Диссертация изложена на 167 страницах, структурно состоит из введения, шести глав и заключения, список литературы содержит 143 библиографические ссылки.

Во введении диссертации кратко представлена мотивация выполненных автором исследований и приведена структура диссертации. Здесь же изложен личный вклад автора и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит исторический обзор экспериментов по изучению тяжелых

кваркониев и кваркониеподобных состояний, теоретических подходов к описанию их структуры, механизмов рождения и распадов.

Глава 2 посвящена описанию ускорительного комплекса KEKB и детекторной установки Belle. Приведены параметры асимметричного электрон-позитронного коллайдера при наборе данных, использованных для представленных в диссертации исследований. Даны общие характеристики систем трекера, электромагнитного калориметра, триггера и сбора данных, изложены методы идентификации частиц и моделирования детектора.

В Главе 3 приведены результаты детального исследования динамики трехчастичных процессов $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$ и $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^0\pi^0$ с использованием данных, полученных в эксперименте Belle. Приводятся результаты полного амплитудного анализа этих процессов и обнаружения заряженных и нейтральных резонансов $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$. Подробно описана методика многопараметрического анализа, включая процедуры отбора событий и подавления фона, используемые статистические методы, детально обсуждены источники систематических ошибок и способы их оценки. Итоговые результаты исследований представлены в виде наглядных таблиц с величинами сечений для трехчастичных процессов, а также масс, ширин, вероятностей распада обнаруженных резонансов.

В Главе 4 изложены результаты исследования трехчастичного процесса $e^+e^- \rightarrow B^*B^*\pi$ и поиска боттомониеподобных резонансов $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ в промежуточных состояниях $e^+e^- \rightarrow Z_b^\pm\pi^\mp \rightarrow (B^*\bar{B}^*)^\pm\pi^\mp$. Кроме описания методики анализа, подробно описана процедура разработанной автором реконструкции B -мезонов. Используя результаты, полученные в этом разделе, а также результаты исследования, описанные в Главе 3, приведены сводные таблицы с результатами измерений величины видимого сечения для трехчастичных процессов $B\bar{B}\pi$, $B\bar{B}^*\pi$ и $B^*\bar{B}^*\pi$ и сечений процессов с распадами Z_b в конечные состояния, содержащие боттомоний. Также в предположении, что приведенный набор каналов распада является полным, вычислены вероятности распадов резонансов $Z_b^+(10610)$ и $Z_b^+(10650)$.

В Главе 5 полученные результаты интерпретируются в совокупности с данными других исследований по обнаружению состояния $X(3872)$ в рамках концепций мезонной молекулы, четырехкварковых и гибридных состояний, динамической модели.

В Главе 6 обсуждаются результаты приведенных исследований, проводится сравнение с результатами эксперимента BESIII по изучению чармония, анализируются перспективы дальнейшего исследования боттомония как в модернизированном эксперименте Belle-II, так и в экспериментах на LHC.

В Заключении просуммированы основные результаты исследований.

Диссертация написана грамотно, содержит обширный графический материал. Источники систематических погрешностей измерений и основные результаты сведены в наглядные таблицы.

Характеризуя диссертацию в целом, можно сказать, что в ней проведено исследование в актуальной области современной физики элементарных частиц, представляющее интерес как для проверки теоретических моделей, так и для анализа современных экспериментальных данных. Работа по реализации исследований по изучению боттомониеподобных состояний выполнена широко и исчерпывающе. При анализе данных эксперимента Belle выполнено много проверок и проведен тщательный анализ источников систематических погрешностей. Следует подчеркнуть, что в работе используются самые современные методы статистического анализа. Важно отметить, что наиболее важные результаты, изложенные в диссертации, включены в регулярные обзоры

по физике частиц Particle Data Group. Все это позволяет заключить, что **результаты являются достоверными**. Отдельно хочется остановиться на том, что автор диссертации не ограничился экспериментальными исследованиями в рамках крупной международной коллаборации, но и внес важный вклад в анализ внутренней структуры кваркононеподобных состояний.

Среди наиболее важных результатов диссертационной работы стоит отметить следующие:

1. Измерение сечений трехчастичных процессов $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$ ($n=1,2,3$), выполнен их полный амплитудный анализ.
2. Наблюдение заряженных боттомониеподобных состояний $Z_b(10610)^\pm$ и $Z_b(10650)^\pm$, измерение величин их масс, ширин, вероятностей распадов и квантовых чисел.
3. Получение указаний на существование нейтральных боттомониеподобных состояний $Z_b(10610)^0$ и $Z_b(10650)^0$ в результате анализа трехчастичного процесса $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^0\pi^0$ ($n=1,2,3$), измерение величин их масс, ширин, вероятностей распадов и квантовых чисел.
4. Измерение сечений трехчастичных процессов $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}^*\pi$ и $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}^*\pi$ и их полный амплитудный анализ, ограничение на величину сечения процесса $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}\pi$.
5. Разработка уникальной методики восстановления сигнала от трехчастичных процессов $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}^*\pi$ по регистрации π -мезона и только одного из В-мезонов, позволяющая существенно увеличить эффективность восстановления.
6. Получение прямых указаний на молекулярную структуру боттомониев по их доминирующему распадам $Z_b(10610) \rightarrow B\bar{B}^* + \bar{B}B^*$ и $Z_b(10650) \rightarrow B^*\bar{B}^*$.
7. Измерение вероятностей распада состояний Z_b .

Стоит отметить, что полный амплитудный анализ трехчастичных процессов $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi\pi$, наблюдение боттомониеподобных состояний $Z_b^\pm(10610)$ и $Z_b^\pm(10650)$ в процессах $e^+e^- \rightarrow Z_b^\pm\pi^\mp \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$ и процессов $e^+e^- \rightarrow (B^*\bar{B}^*)^\pm\pi^\mp$ **осуществлено впервые**.

По результатам исследований замечаний нет. Несколько замечаний по формулировкам и форме представления результатов:

- Несмотря на очевидную актуальность и значимость приведенных в диссертации исследований, можно указать на то, что во введение это описано очень кратко и недостаточно полно. Исследования мирового уровня могли бы быть мотивированы более емко и педагогически.
- В работе указано (в частности, на стр. 47), что для моделирования физических процессов использовались генераторы взаимодействий Jetset и PYTHIA. Так как нигде не сказано о корректирующем сечение факторе, можно предположить, что сечение вычислялось в главном порядке теории возмущений. Неясно, выполнялась ли оценка влияния вкладов высших порядков на величину фоновых процессов, и как это влияет на соотношение сигнал/шум и всю процедуру статистического анализа.
- Не для всех наблюдаемых резонансов приведена величина статистической значимости. Например, в Главе 3 на стр. 100 и в Заключении на стр. 143

приведено значение статистической значимости 6.3σ для резонанса $Z_b(10610)^0$. Однако для резонансов состояний $Z_b(10610)^\pm$, $Z_b(10650)^\pm$ и $Z_b(10650)^0$ подобных оценок в диссертации недается.

- По величине статистической значимости 6.3σ для резонанса $Z_b(10610)^0$ делается вывод об указании на его существование. Стандартная мировая практика позволяет трактовать наблюдение со статистической значимостью выше 5σ как полноценное наблюдение/открытие.

Упомянутые недостатки и замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Диссертационная работа Гармаша А.Ю. выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершенный научный труд, результаты которого можно охарактеризовать как **значительный вклад** в спектроскопию боттомониеподобных состояний, что может привести к важному вкладу в развитие теории сильных взаимодействий. В работе сформулирована и выполнена широкая программа по поиску и изучению боттомониеподобных состояний, проведено обнаружение экзотических боттомониеподобных состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$, изучение их свойств, предложена модель для описания структуры обнаруженных состояний. Качество и объем проведенных работ, использованные в диссертации статистические методы характеризуют соискателя как исследователя самого высокого уровня.

Апробация работы состоялась на ведущих в области физики высоких энергий международных конференциях и рабочих совещаниях, все научные результаты диссертации опубликованы в статьях автора в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК. Автореферат диссертации полно и правильно отражает основное содержание диссертации.

Принимая во внимание вышеизложенное, считаю, что рассмотренная диссертация Гармаша А.Ю. «Изучение боттомониевоподобных состояний в эксперименте Belle» безусловно соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Гармаш Алексей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент
Шматов Сергей Владимирович
Доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц, начальник сектора
Лаборатории физики высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

 С.В. Шматов

Дата: 30.03.2022

Адрес служебный: 141980, Россия, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри 6,
Лаборатория физики высоких энергий, Объединенный институт ядерных исследований,
тел. 8(496) 2163445, e-mail: shmatov@cern.ch, shmatov@jinr.ru.

Подпись д.ф.м.н, начальника сектора ЛФВЭ ОИЯИ Шматова С.В. удостоверяю

Ученый секретарь Лаборатории физики высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований  А.П. Чеплаков