

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Коваленко Евгения Александровича “Измерение вероятностей переходов между состояниями системы боттомония с излучением псевдоскалярных мезонов в эксперименте Belle”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Актуальность исследования

Первая, методическая, часть диссертации Коваленко Евгения Александровича посвящена определению оптимальных параметров работы “Монитора светимости” — системы, установленной на ускорительном комплексе SuperKEKB в г. Цукуба в Японии, которая измеряет светимость в режиме реального времени на основании скорости счета событий e^+e^- -рассеяния на большие углы. Эти измерения являются исключительно важными для настройки ускорителя, контроля процесса набора данных и его планирования в ситуации повышенной точности данных. Вторая часть диссертации Евгения Александровича посвящена экспериментальному изучению адронных переходов между состояниями в семействе боттомония (то есть между мезонами, содержащими валентные b - и \bar{b} -кварки), которые происходят за счёт излучения η -, η' - и π^0 -мезонов. Главный рабочий массив данных, используемый для этого в диссертации, составляют (118.0 ± 1.9) фб⁻¹ интегральной светимости, набранной на $\Upsilon(5S)$ -резонансе с помощью детектора Belle. Экспериментальные измерения подобных адронных переходов между состояниями боттомония является принципиально важными для понимания кварковой структуры самих $b\bar{b}$ -объектов и представляет вызов и стимул для современных теоретических исследований.

Диссертация включает введение, пять глав и заключение. Первая глава посвящена описанию классификации состояний семейства боттомония и рассмотрению основных переходов между ними с излучением легких адронов. Вторая глава содержит описание эксперимента с детектором Belle и его модернизированной версии Belle II. Третья глава посвящена методической части диссертации — измерению светимости в режиме реального времени с помощью Монитора светимости в экспериментах, проводимых на модернизированном детекторе Belle II. В четвертой главе приведено описание результатов изучения адронных переходов между состоянием $\Upsilon(5S)$ и состояниями $\Upsilon(1S, 23)$ с излучением η - и η' -мезонов. Пятая глава посвящена изучению адронных распадов $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta(\pi^0)$ и $h_b(1P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0$. В заключении кратко перечислены основные результаты диссертации. Работа была выполнена в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН в коллаборации с лабораториями Belle и Belle II ускорительных комплексов KEKB и SuperKEKB, которые являются ведущими мировыми центрами по физике высоких энергий.

Результаты проделанной автором работы, составляющие материал диссертации, опубликованы в международных научных журналах, докладывались и обсуждались на научных семинарах ИЯФ СО РАН, а также на международных конференциях, труды которых изданы в периодических научных изданиях. Из всего сказанного выше следует, что тема диссертации современна и **актуальна**.

Достоверность исследования

В диссертации тщательно изложены все этапы работы, связанные с мониторингом светимости в эксперименте Belle II, с измерениями и изучением процессов распада $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S, 23)\eta$ и $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta'$, а также с измерениями и изучением распадов $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta(\pi^0)$ и $h_b(1P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0$.

Диссертация написана ясным языком. Изложение материала хорошо продумано. Результаты диссертации опубликованы в ведущих международных рецензируемых научных журналах Physical Review Letters, Physical Review D и Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A и в периодических изданиях трудов международных конференций. Публикации проиндексированы в базах данных Web of Science и Scopus. Результаты работы докладывались также на конкурсах молодых ученых, семинарах в ИЯФ СО РАН и на собраниях коллаборации Belle. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о **достоверности исследования** и **высокой степени обоснованности** научных результатов, представленных в диссертации.

Научная новизна работы

В целом диссертация Е. А. Коваленко представляет собой существенный законченный этап исследований в области экспериментальной физики элементарных частиц, имеющий **научную ценность**. В ней получены **оригинальные результаты**, находящиеся на современном **мировом уровне** и определяющие этот уровень. В диссертации автор продемонстрировал владение всем современным арсеналом методов экспериментальной физики высоких энергий, направленных на всестороннее изучение эксклюзивных процессов e^+e^- -аннигиляции в адроны в области боттомония. Им развит **новый метод** измерения светимости в режиме реального времени в экспериментах, проводящихся на установке Belle II.

Как уже отмечалось выше, диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Представленные в диссертации рисунки и таблицы наглядно иллюстрируют результаты проведённых измерений и исследований, а также всю последовательность разработки и реализации процедуры мониторинга светимости, предложенной автором.

Во **Введении** дана общая характеристика представленного диссертационного исследования, сформулированы его цели и задачи, отмечена научная новизна темы исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации данных, перечислены полученные автором научные результаты, выносимые на защиту.

В **Первой главе** приводится классификация состояний семейства боттомония, описываются теоретические модели, используемые для расчётов адронных переходов между состояниями боттомония, а также модели, предложенные для описания резонансов Z_b и $\Upsilon(10750)$ — кандидатов в экзотические состояния, и аномальных свойств состояний $\Upsilon(4S)$ и $\Upsilon(5S)$. Обращается внимание на существенную разницу в свойствах Υ -состояний с массами ниже и выше порога рождения пары $B\bar{B}$ -мезонов. Отмечается, что теория не в состоянии описать распадные свойства тяжёлых Υ -резонансов. Предсказания теории и данные опытов для этих состояний расходятся в десятки и даже более, чем в сто раз. Фактически какая-либо надёжная теоретическая схема в данном случае пока отсутствует. Что касается многокварковых состояний, различающихся типами связи между составляющими, то все они представляют собой идеализированные предельные случаи, между которыми имеется непрерывный

переход, и ни одна из предложенных моделей не может объяснить все наблюдаемые свойства тяжёлых состояний боттомония.

Вторая глава посвящена описанию экспериментов Belle и его модернизированной версии Belle II. В разделе 2.1 детально описаны устройство ускорительного комплекса КЕКВ, детектор Belle, система идентификации частиц, а также наборы данных эксперимента Belle, выбранные в качестве основы проведённого в диссертации анализа распадов тяжёлых состояний боттомония. В 2018 году в лаборатории высоких энергий КЕК на коллайдере SuperKEKB начался эксперимент Belle II. Проектная светимость коллайдера составляет $6 \times 10^{35} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что в 30 раз больше предыдущего мирового рекорда, поставленного экспериментом Belle. В разделе 2.2 подробно рассказано о физической программе эксперимента Belle II, о глубоко модернизированном ускорительном комплексе SuperKEKB, на котором используется так называемая схема “нано-пучков”, о собственно детекторе Belle II и его многочисленных подсистемах, главными из которых являются вершинный детектор, центральная дрейфовая камера, система идентификации частиц, которая эффективно разделяет каоны и пионы во всем диапазоне их возможных импульсов, пробегная система и электромагнитный калориметр. В разделе 2.3 речь идёт о моделировании детектора на основе метода Монте-Карло. Эта важнейшая процедура обработки данных состоит из трех частей: генерация событий, моделирование взаимодействия рожденных частиц с веществом детектора и отклика его подсистем, и реконструкция частиц. В целом глава производит сильное впечатление.

Третья глава представляет важный методический результат диссертации — введение в строй, устройство и работу Монитора светимости на детекторе Belle II. Она начинается с описания одной из главных характеристик работы ускорителя, которой является его светимость. Подчёркивается, что для корректировки параметров работы ускорителя и настройки места встречи сталкивающихся пучков, направленных на достижение желаемой светимости, критически необходимо измерение светимости в реальном времени. Для устойчивого к фону и непрерывного измерения светимости в абсолютных единицах в ИЯФ СО РАН был разработан специальный электронный модуль “Монитор светимости”. Функцией модуля является измерение скорости счета событий e^+e^- -рассеяния и событий $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ под большими углами, основывающееся только на сигналах с торцов электромагнитного калориметра. Далее следует подробное описание процесса работы Монитора светимости, а также его энергетической калибровки и временной синхронизации, необходимой для правильного учета сигналов вето инжекции и мертвого времени системы сбора данных. Затем во всех деталях описывается Моделирование Монитора светимости с помощью метода Монте-Карло. Приведена итоговая параметризация видимого сечения процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ в области энергий от $\Upsilon(4S)$ - до $\Upsilon(6S)$ -резонансов. Отмечается важность использования сигнала качества для подавления вклада пучкового фона и фона инжекции. Описаны эффекты, являющиеся основными источниками систематической погрешности при измерении светимости, и приведена расчётная величина итоговой систематической погрешности. Указаны значения, выбранные для основных параметров, управляющих работой Монитора светимости. Глава заканчивается формулировкой результатов работы Монитора светимости. Автор отмечает, что разработанный для эксперимента Belle II Монитор светимости демонстрирует стабильную и надёжную работу начиная с 2017 года, измеряя

в режиме реального времени мгновенную и интегральную светимости, как произведенную ускорителем, так и записанную детектором. Модуль был успешно интегрирован в процесс работы коллайдера SuperKEKB, где он играет важную роль в оптимизации параметров пучков и предоставлении данных о светимости для коллаборации Belle II.

Четвёртая глава посвящена изучению процессов $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S, 2S)\eta$ и $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta'$. В пункте 4.1 описаны применяемые многочисленные критерии отбора $\mu^+\mu^-\pi^+\pi^-\gamma(\gamma)$ -событий, из которых предстоит выделить конкретные каналы распада $\Upsilon(5S)$ -резонанса, и определены эффективности регистрации полезных событий. Важным этапом анализа при этом является понимание возможных опасных фоновых процессов с излучением $\eta^{(\prime)}$ -мезона и выбор способов их эффективного подавления. Все детали здесь тщательно описаны. Затем автор переходит к важнейшему этапу — определению видимых сечений рассматриваемых эксклюзивных процессов и величин относительных вероятностей распада $\Upsilon(5S)$. В результате работы им произведено первое в мире наблюдение процессов $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(2S)\eta$ и $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$ при энергии $\sqrt{s} = 10866$ ГэВ. Им также впервые получены ограничения на видимое сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(1S)\eta'$ в двух модах распада η' -мезона и относительную вероятность распада $\Upsilon(5S)$ по $\Upsilon(1S)\eta'$ -каналу. В пункте 4.4 анализируется видимое сечение, σ_{vis} , вне $\Upsilon(5S)$ -резонанса с привлечением данных сканирования и формулы, связывающую σ_{vis} с борновским сечением, одетым радиационной поправкой на излучение фотона в начальном состоянии. Последние два пункта этой главы посвящены изучению систематических погрешностей при определении борновских сечений и относительных вероятностей распадов и обсуждению результатов измерений. Все три основных результата являются впечатляющими. Во-первых, подтверждено аномально большие вероятности переходов $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S, 2S)\eta$ по сравнению с $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S, 2S)\pi^+\pi^-$. Расхождения с теоретическими ожиданиями здесь составляют $\simeq 17$ раз для $\Upsilon(1S)$ и $\simeq 40$ для $\Upsilon(2S)$. Кроме того, на отношение между процессами $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta'$ и $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$ получен верхний предел, который на два порядка меньше теоретического значения, ожидаемого в рамках мультипольного разложения. Автор отмечает, что дополнительный набор данных в районе $\Upsilon(5S)$ -резонанса в эксперименте Belle II позволит изучить адронные переходы в семействе боттомония с новым уровнем точности.

Пятая глава посвящена изучению процессов $h_b(1P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0$ и $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta(\pi^0)$. Сначала подробно обсуждается отбор событий. Общая идея заключается в полной реконструкции процесса $e^+e^- \rightarrow h_b(1P, 2P)\pi^+\pi^-$ с последующими распадами $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta(\pi^0)$ либо $h_b(1P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0$, $\eta(\pi^0) \rightarrow \gamma\gamma$ и $\Upsilon(1) \rightarrow l^+l^-$, где l — электрон или мюон. Для оптимизации критериев отбора используется Монте-Карло моделирование, а также ряд дополнительных кинематических ограничений. Определяется эффективность реконструкции $h_b(1P, 2P)$ -мезонов. Изучаются ожидаемые опасные фоновые процессы и представлены требования для их эффективного подавления. После анализа экспериментальных данных и изучения систематических погрешностей обсуждаются результаты проведённых измерений. Для распада $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$ статистическая значимость составляет 3.5σ , с учетом систематических погрешностей, что соответствует первому свидетельству этого распада. На относительные вероятности переходов $h_b(1P, 2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0$ впервые поставлены верхние пределы.

В **Заключении** перечислены семь основных результатов данной работы

по изучению вероятностей адронных переходов в системе боттомония в эксперименте Belle и реализации процедуры энергетической калибровки и временной синхронизации Монитора светимости в эксперименте Belle II. Автор отмечает, что дальнейшие перспективы изучения процессов, рассмотренных в диссертации, связаны с набором данных детектором Belle II на энергии, соответствующей $\Upsilon(5S)$ -резонансу. Это позволит изучить адронные переходы в семействе боттомония на новом уровне точности и надежно обнаружить переход $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$.

Подводя итог, скажу, что замечаний по физике дела у меня нет. Здесь всё хорошо. Работа представляет собой современное важное нацеленное на перспективу научное исследование. Успех работы основан на практическом вкладе автора в функционирование Монитора светимости на одном из лучших в мире детекторов частиц Belle II, на получении им физически важных сведений о редких распадах $\Upsilon(5S)$ - и $h_b(1P, 2P)$ -резонансов, извлечённых из данных эксперимента Belle, и, конечно, на его скрупулёзном подходе к решению поставленных задач.

Основные результаты диссертации опубликованы в научных изданиях, соответствующих списку ВАК РФ, они хорошо известны специалистам в области физики высоких энергий как экспериментаторам, так и теоретикам и докладывались автором на международных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Коваленко Евгения Александровича является законченной научной работой, она соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, и её автор, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Я, Шестаков Георгий Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Коваленко Евгения Александровича, и их дальнейшую обработку.

Отзыв предоставил официальный оппонент

Шестаков Георгий Николаевич,



Г. Н. Шестаков

доктор физико-математических наук, специальность

01.04.0.2 — Теоретическая физика, доцент,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения

Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Лаборатории теоретической физики,

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 4,

телефон: 8(383)3297612, e-mail: shestako@math.nsc.ru

14 апреля 2026 г.

Подпись Г. Н. Шестакова заверяю

Учёный секретарь ИМ СО РАН

кандидат физико-математических наук

14 апреля 2026 г.



Н. А. Даурцева