

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

**Куденко Юрия Григорьевича**

на диссертационную работу

**Коваленко Евгения Александровича**

**«ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПЕРЕХОДОВ МЕЖДУ  
СОСТОЯНИЯМИ СИСТЕМЫ БОТТОМОНИЯ С  
ИЗЛУЧЕНИЕМ ПСЕВДОСКАЛЯРНЫХ МЕЗОНОВ В  
ЭКСПЕРИМЕНТЕ BELLE »**,

**представленную на соискание ученой степени**

**кандидата физико-математических наук по специальности**

**1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика  
высоких энергий**

Диссертационная работа Е.А.Коваленко состоит из двух частей. Методическая часть работы посвящена определению оптимальных параметров Монитора светимости коллайдера SuperKEKB. Монитор светимости разработан и создан с использованием электромагнитного калориметра на основе CsI(Tl) детектора Belle II. Вторая часть работы посвящена изучению адронных переходов между состояниями боттомония, которые обладают аномальными свойствами выше порога рождения системы  $B\bar{B}$ . Детальное изучение таких переходов является важным этапом для понимания физики В-мезонов и построения теоретических моделей. Таким образом, **актуальность** данной работы не вызывает сомнений.

**Научная новизна** исследования может быть кратко просуммирована ниже. Успешно функционирует Монитор светимости, который измеряет светимость SuperKEKB с точностью лучше 1%. Впервые наблюдались и измерены переходы  $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S, 2S)\eta$ , впервые измерена относительная вероятность перехода  $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$ , впервые получены экспериментальные пределы на ряд адронных переходов между состояниями боттомония. Полученные результаты **практически применены** в современном эксперименте мирового уровня BELLE-II. Успешное функционирование коллайдера SuperKEKB, стабильная работа детектора Belle II на протяжении многих лет, эффективный набор данных, постоянный контроль за стабильностью параметров ускорителя и детектора подтверждают **обоснованность и достоверность полученных результатов**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во **введении** обоснована актуальность исследований, представлен обзор экспериментальных результатов по теме исследований, определена цель работы, сформулированы задачи, стоящие перед исследованием, отмечена научная новизна темы исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, апробация результатов и публикации, личный вклад соискателя, а также объем и структура работы.

**Первая глава** диссертации посвящена описанию классификации состояний семейства боттомония — связанного состояния  $b$ - и анти- $b$ -кварков, а также рассмотрению основных переходов между ними с излучением псевдоскалярных мезонов. Кратко изложена история обнаружения боттомония в протон-ядерных соударениях и на  $e^+e^-$  коллайдерах. Интересными являются состояния выше порога рождения  $B\bar{B}$ , которые обладают аномальными свойствами. Например, состояние  $\Upsilon(10860)$ . Для объяснения аномальных свойств  $\Upsilon(4S)$  и  $\Upsilon(5S)$  предложен ряд моделей (гибриды, компактные тетракварки и др.), которые кратко описаны в этой главе. Состояния ниже порога рождения  $B\bar{B}$  также интересны, поскольку позволяют проверить эффективные теории поля и изучать структуру состояний.

В **Главе 2** описаны эксперименты Belle и Belle II на асимметричном  $e^+e^-$  коллайдере КЕКВ, энергия электронов которого составляет 8 ГэВ, а позитронов 3.5 ГэВ. За время работы эксперимента Belle был набран интеграл светимости около  $1000 \text{ фб}^{-1}$  в диапазоне энергий от 9.46 ГэВ до 11.02 ГэВ в системе центра масс, что соответствует резонансам  $\Upsilon(1S) - \Upsilon(6S)$ . Кратко описан ускорительный комплекс КЕКВ, представлены его основные параметры. Представлены основные подсистемы детектора Belle: кремниевый вершинный детектор, центральная дрейфовая камера, время-пролетная система и аэрогельные черенковские счетчики, электромагнитный калориметр, пробежная система. Приведены полученные параметры этих детекторов, рассмотрена идентификация частиц. В 2010 году эксперимент Belle был завершен и началась модернизация всех систем для эксперимента Belle II, закончившаяся к 2018 г. Основным отличием SuperKEKB является использование так называемой схемы «нано-пучков». Энергии электронов и позитронов составили 7 ГэВ и

4 ГэВ вместо 8 ГэВ и 3.5 ГэВ. В главе представлены проектные параметры коллайдера SuperKEKB. Также представлено описание детектора Belle II и его основных подсистем. В частности, подробно рассмотрена электроника и система сбора данных калориметра CsI(Tl), на основе которых реализован Монитор светимости.

**Глава 3** посвящена измерению светимости в режиме реального времени на эксперименте Belle II. Эти измерения необходимы для настройки ускорителя, контроля процесса набора данных и его планирования. Для непрерывного измерения светимости в абсолютных единицах и устойчивой к фону в ИЯФ СО РАН был разработан Модуль светимости, который измерял скорость счета процессов  $e^+e^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  под большими углами, используя сигналы с торцов электромагнитного калориметра. Описан принцип работы Монитора светимости, Монте Карло моделирование, энергетическая калибровка и временная синхронизация, выбор рабочих параметров, систематические погрешности и результаты. Монитор светимости успешно функционирует и используется для контроля и оптимизации параметров ускорителя SuperKEKB. Как следует из сравнения on-line и off-line светимостей, Монитор светимости демонстрирует стабильную и надежную работу на протяжении нескольких лет набора статистики, начиная с 2017 г.

**Глава 4** посвящена изучению адронных переходов между  $\Upsilon(5S)$  и  $\Upsilon(1S, 2S)$  с излучением  $\eta$  и  $\eta'$  мезонов. Детально изложен алгоритм отбора событий, представлены критерии отбора событий и полученные эффективности реконструкции событий. Подробно рассмотрены и проанализированы фоновые процессы, которые могут имитировать исследуемые процессы. Анализируется общий для всех процессов распад  $\Upsilon(1S, 2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$ , позволяющий восстанавливать  $\Upsilon(1S, 2S)$  по измеренной инвариантной массе двух мюонов. В главе детально рассмотрены и суммированы систематические погрешности вероятностей распадов и борновских сечений.

В **Главе 5** представлено исследование переходов  $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta(\pi^0)$  и  $h_b(1P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0$ . Изложена общая идея и описаны критерии отбора полезных событий. Для подавления фона и улучшения измерения энергии фотонов применяется кинематическая реконструкция всех 6 конечных частиц. В результате разрешение инвариантной массы двух фотонов было улучшено на 15-20%. Описан анализ экспериментальных данных, изучены фоновые процессы и систематические погрешности. В результате анализа получены относительные вероятности переходов  $B(h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta)$ ,  $B(h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0)$  и  $B(h_b(1P) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^0)$ .

В **Заключении** представлены полученные в этой работе результаты и выводы.

Следует особо подчеркнуть наиболее важные результаты этой работы. Для эксперимента Belle II автором разработано моделирование Монитора светимости детектора Belle II, выполнена оптимизация его рабочих параметров, изучены систематические погрешности. В результате с использованием Монитора светимости удалось достичь точности лучше 1% измерения светимости коллайдера SuperKEKB. В работе впервые измерены относительные вероятности переходов  $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$  и  $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(2S)\eta$ , с испусканием  $\eta$ -мезона, получены борновские сечения нескольких  $e^+e^-$  процессов на  $\Upsilon(5S)$  резонансе. Впервые измерена относительная вероятность перехода  $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$ , величина которой оказалась более чем на порядок ниже теоретических предсказаний.

Из недостатков диссертации можно отметить следующие.

1. На стр.54 приведены сечение  $e^+e^-$  рассеяния и сечение аннигиляции в пару фотонов. Измеренные (видимые) сечения существенно ниже, что объясняется учетом эффективности Монитора светимости. Однако, величина эффективности неизвестна. Представляется, что автору следовало бы привести значение эффективности и изложить, как эффективность была определена.
2. Для рисунков 2.2 и 2.4 был использован рисунок 1.9 (arXiv:1011.0352), который разделен на две части: верхняя показывает половину детектора, который планируется модернизировать, а нижняя детектор Belle до модернизации. Из этого рисунка в диссертации автором были составлены два полных рисунка детекторов. Полагаю, что было бы лучше сослаться и использовать для изображения и описания детектора до модернизации оригинальную статью *The Belle Detector, Nucl.Instrum.Meth.A* 479 (2002) 117-232, а для детектора после модернизации *The Belle II Physics Book, PTER* 2019 (2019) 12, 123C01, *PTER* 2020 (2020) 2, 029201.
3. В главе 1 можно было бы добавить возможные в теории диаграммы переходов, например  $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)\eta$ ,  $\Upsilon(3S) \rightarrow h_b(1P)\pi^0$ , и других. Это бы полезно для понимания физики этих процессов и возможных

вариантов объяснения отличия экспериментальных результатов, полученных в этой работе, от теоретических предсказаний.

4. На стр.103 приведены полученные вероятности переходов и отношение  $\Gamma[h_b(2P) \rightarrow Y(1S)\eta]$  к  $\Gamma[Y(3S) \rightarrow h_b(1P)\pi^0]$ , которое существенно отличается от теоретического предсказания. Автор кратко упоминает причины возможного различия. Однако, следовало бы более подробно обсудить возможные причины расхождения экспериментального результата и модельных предсказаний.
5. Не совсем понятно сравнении экспериментальных данных и Монте Карло моделирования. Например, на рисунках 4.6, 4.8 наблюдается большое расхождение между Монте Карло и экспериментальными данными. В тексте не представлено ясного объяснения причины такого расхождения. Например, что представляют собой заштрихованные гистограммы на этих рисунках? Фон или сигнальные процессы?

Однако отмеченные выше недостатки не могут изменить положительного впечатления от работы и существенным образом повлиять на общую оценку диссертации, которая представляет собой законченное исследование. Диссертация Е.А.Коваленко оставляет хорошее впечатление. Соискатель проделал огромный объем работы и создал современное программное обеспечение. Разработанные им программы, коды используются в реальном действующем эксперименте BELLE II, позволяют проводить контроль параметров детектора, эффективно производить набор статистики и дальнейший анализ с накопленными данными. Соискателем получены интересные результаты по исследованию адронных переходов между состояниями боттомония. Результаты работы опубликованы в ведущих мировых журналах по физике высоких энергий и методике эксперимента, доложены на российских и международных конференциях. Диссертация аккуратно оформлена, хорошо иллюстрирована качественными рисунками. Содержание **автореферата** полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Принимая во внимание вышеизложенное, считаю, что рассмотренная диссертация Коваленко Евгения Александровича «Измерение вероятностей переходов между состояниями системы боттомония с излучением

псевдоскалярных мезонов в эксперименте BELLE» полностью соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Я, Куденко Юрий Григорьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Коваленко Евгения Александровича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Куденко Юрий Григорьевич

доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент РАН

(01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц ),

Заведующий Отделом физики высоких энергий ИЯИ РАН,

главный научный сотрудник,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН)

адрес: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, 7А

тел: +7(495)850-42-48

email: [kudenko@inr.ru](mailto:kudenko@inr.ru)

12 мая 2026 г.

Куденко Юрий Григорьевич

Подпись Ю.Г. Куденко заверяю

Зам. директора ИЯИ РАН

Панин Александр Григорьевич

