

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Данилиной Анны Владимировны «Редкие четырехлептонные распады B -мезонов в Стандартной модели», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Диссертация **А.В. Данилиной** посвящена теоретическому исследованию четырехлептонных распадов B -мезонов в Стандартной модели (включая распады заряженных B -мезонов на три легких заряженных лептона и нейтрино, а также распады нейтральных B -мезонов на четыре легких заряженных лептона).

Согласно предсказаниям Стандартной модели, парциальные ширины рассматриваемых распадов имеют порядок величины $\sim 10^{-7}$ и менее, что делает эти процессы трудно наблюдаемыми, поэтому эти распады называют *редкими*. Коллаборация LHCb (ЦЕРН, Швейцария) в настоящее время установила жесткие верхние пределы на парциальные ширины распадов $B_{d,s} \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ и $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\mu \mu^+$. Однако нет никакого сомнения в том, что в ближайшие годы данные парциальные ширины будут экспериментально измерены.

Теоретическое исследование различных характеристик многолептонных распадов B -мезонов представляет самостоятельный интерес, так как открывает возможность проведения прецизионной проверки предсказаний Стандартной модели в высших порядках теории возмущений. С другой стороны, редкие распады B -мезонов, в которых вклад «стандартной» физики сильно подавлен, могут оказаться весьма чувствительными к проявлению «новой» физики за пределами Стандартной модели. Заметим, что поиск эффектов «новой» физики в настоящее время активно ведется в различных экспериментах на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН. Все это говорит об **актуальности и важности** исследований, проведенных в диссертации **А.В. Данилиной**.

Перейдем к содержанию диссертации. Диссертация состоит из введения, двух глав основного текста и заключения. Материал изложен на 97 страницах, включает 36 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 68 библиографических ссылок.

Во **Введении** автор объясняет цели и задачи работы, обосновывает актуальность темы исследования, его научную новизну и практическую ценность, обсуждает методологию исследования, степень его достоверности, а также формулирует выносимые на защиту положения.

В **первой главе** диссертационной работы **А.В. Данилина** проводит теоретическое исследование распадов заряженных B -мезонов на три легких заряженных лептона и нейтрино в рамках Стандартной модели. При этом рассматриваются как распады с лептонами различного аромата в конечном состоянии ($B^- \rightarrow \ell^+ \ell^- \bar{\nu}_\ell \ell'^-$, $\ell = e, \mu$), так и процессы с одинаковыми лептонами в конечном состоянии ($B^- \rightarrow \ell^+ \bar{\nu}_\ell \ell^+ \ell^-$, $\ell = e, \mu$). В начале главы автор дает анализ различных оценок для парциальных ширин распадов заряженных B -мезонов, затем выписывает эффективный гамильтониан и приводит основные определения адронных формфакторов. При дальнейшем расчете амплитуд процессов учитываются вклады промежуточных $\rho^0(770)$ - и $\omega(782)$ -резонансов, вклады тормозного излучения и нерезонансного вклада $b\bar{b}$ -пар. В последних разделах главы приводятся выражения для парциальных ширин распадов и обсуждаются численные результаты.

В частности, здесь обсуждается проблема превышения теоретического предсказания для парциальной ширины распада $B^- \rightarrow \mu^+ \bar{\nu}_\mu \mu^+ \mu^-$, полученного автором, над экспериментальным верхним пределом, установленным коллаборацией LHCb. С моей точки зрения, существование такого расхождения между теорией и экспериментом не является недостатком рассматриваемой диссертации. Напротив, наличие обсуждения данной проблемы говорит о научной честности автора диссертации. Предложенное в диссертации объяснение путем введения относительной фазы между вкладами $\rho^0(770)$ - и

$\omega(782)$ -резонансов решает данную проблему. Возможно, что это решение носит «временный» характер, однако исследования продолжаются, и нет никаких оснований сомневаться в том, что в ближайшее время проблема рассогласования данных теории и эксперимента найдет свое окончательное решение.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому исследованию распадов нейтральных B -мезонов на четыре легких заряженных лептона. При этом автор придерживается последовательности изложения материала, аналогичной используемой в первой главе. Так, в **первой части** второй главы **А.В. Данилина** исследует распад $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$. Амплитуда данного распада рассчитывается с учетом вкладов $\varphi(1020)$, $\psi(3770)$, $\psi(4040)$, $\psi(4160)$, $\psi(4415)$, $\rho^0(770)$ и $\omega(782)$ -резонансов, вкладов «хвостов» от J/ψ и $\psi(2S)$, $b\bar{b}$ -пар, процессов тормозного излучения и слабой аннигиляции. В последних разделах первой части главы обсуждаются дифференциальные распределения для распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$ и приводится выражение для парциальной ширины распада.

Во второй части второй главы автор проводит аналогичное теоретическое исследование распада $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$. Амплитуда данного распада рассчитана с учетом вкладов $\varphi(1020)$, $\psi(3770)$, $\psi(4040)$, $\psi(4160)$, $\psi(4415)$, $\rho^0(770)$ и $\omega(782)$ -резонансов, вкладов «хвостов» от J/ψ и $\psi(2S)$, $b\bar{b}$ -пар, процессов тормозного излучения и слабой аннигиляции. В конце главы приводятся значения парциальной ширины распада и обсуждаются дифференциальные распределения для распада $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$. Следует подчеркнуть, что теоретические расчеты находятся в уверенном согласии с известными экспериментальными ограничениями.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации, а также сформулированы следующие из них выводы.

В приложение вынесен ряд материалов вспомогательного характера.

Представленные в диссертации научные результаты являются **новыми, обоснованными и достоверными**. Основные результаты диссертационной

работы своевременно и полно опубликованы в научной литературе. Всего по теме диссертации опубликовано 7 работ в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, WoS, RSCI. Результаты диссертации докладывались на международных и российских конференциях. Исследования, представленные в диссертации, отмечены рядом престижных наград для молодых ученых.

Достоверность и обоснованность положений и выводов, сформулированных в диссертации, обусловлена использованием фундаментальных методов квантовой теории поля и физики элементарных частиц, а также корректностью аналитических и численных расчетов. Результаты, полученные автором данной диссертационной работе, сравнивались с теоретическими предсказаниями других авторов и не противоречат современным экспериментальным данным.

Теоретическая и практическая значимость проведенных автором диссертации исследований несомненна. Действительно, все предсказания, касающиеся четырехлептонных распадов заряженных и нейтральных B -мезонов, полученные в данной диссертации, являются либо первыми предсказаниями в данной области (распады заряженных B -мезонов и распад $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$), либо наиболее полными из имеющихся на сегодняшний день (распады $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$ и $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$). На основании результатов, полученных в диссертационной работе, реализован ряд теоретически обоснованных моделей для генератора Монте-Карло в рамках программного пакета EvtGen. Некоторые из этих модели уже включены в базу программного обеспечения коллаборации LHCb, а другие модели находятся на этапе подготовки к имплементации в указанную выше базу.

Диссертационная работа в целом производит благоприятное впечатление. Автор продемонстрировала уверенное владение техникой весьма нетривиальных численных расчетов. Диссертация хорошо оформлена, снабжена большим количеством рисунков.

Диссертация соответствует специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий**, а именно ее направлению 9: «Структура и распадные свойства адронов, лептонов и других элементарных частиц – эксперимент и теория».

По диссертации имеется ряд небольших замечаний:

1. Некоторые рисунки (например, на с. 29, 34, 35, 36, 44, 61, 66) кажутся очень мелкими, их нужно было бы дать крупнее,
2. Список литературы оформлен не по ГОСТу,
3. К сожалению, тексты диссертации и автореферата не свободны от опечаток, и в частности:
 - На с. 5 в слове «характеристик» вместо буквы «р» написано «п»,
 - На с. 9 в слове «экспериментального» пропущена буква «е»,
 - На с. 9 в слове «реализована» есть лишняя буква «н»,
 - На с. 9 в слове «рассчитанных» пропущена буква «с»,
 - На с. 51 в слове «расчете» есть лишняя буква «с».

Отмеченные замечания не имеют, по существу, отношения к содержанию диссертации и не снижают ее оценки.

В целом, можно сказать, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершенное научное исследование, имеющее существенное значение для физики элементарных частиц. Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий** (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени

кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель **Данилина Анна Владимировна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.**

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры теоретической физики
ФГАОУ ВО «Московского
физико-технического института
(национального исследовательского
университета)» (МФТИ)

Тернов Алексей Игоревич

Контактные данные:

тел.: 7(495)408-75-90, e-mail: ternov.ai@mipt.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02 – «теоретическая физика»

Адрес места работы:

141701, Московская область, г. Долгопрудный,
Институтский переулок, д. 9.

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)» (МФТИ),
кафедра теоретической физики

Тел.: 7(495)408-75-90; e-mail: theorphys@phystech.edu

Подпись профессора кафедры
теоретической физики ФГАОУ ВО «МФТИ»
А.И. Тернова удостоверяю:

Ученый секретарь МФТИ,
кандидат физико-математических наук,
доцент, **Евсеев Е. Г.**

