

ОТЗЫВ

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

Исследование четырехлептонных распадов B мезонов позволяет провести прецизионную проверку стандартной модели элементарных частиц и вести поиск возможных отклонений от ее предсказаний за счет вкладов так называемой «новой физики». Действительно, такие распады возможны в стандартной модели только в высших порядках теории возмущений и поэтому имеют крайне малые парциальные ширины. Кроме того распады B мезонов в четырехлептонные конечные состояния могут служить фоновыми процессами для подавленных по спиральности сверхредких лептонных распадов $B_{d,s} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ или $B_{d,s} \rightarrow e^+ e^-$. В настоящее время коллаборация LHCb на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе активно ведет поиски четырехлептонных распадов $B_{d,s} \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ и $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\mu \mu^+$. Необходимо отметить, что до недавнего времени надежных теоретических предсказаний для парциальных ширин и других характеристик таких распадов не существовало. Поэтому изучение редких четырехлептонных распадов заряженных и нейтральных B мезонов в стандартной модели представляет собой крайне актуальную задачу. Детальному исследованию процессов такого типа посвящена диссертация Данилиной А.В.

Диссертационная работа состоит из введения, двух глав и заключения.

Во введения определены цели и задачи исследования, обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость представленной

работы. Проанализированы основные положения, которые выносятся на защиту, и проведено их обсуждение.

В первой главе проведено теоретическое исследование распадов заряженных B мезонов на три легких заряженных лептона и нейтрино в рамках стандартной модели. Рассмотрены не только распады с лептонами различного аромата в конечном состоянии, но и процессы с идентичными лептонами. В начале главы представлены оценки для парциальных ширин распадов заряженных B мезонов в конечное состояние с тремя легкими заряженными лептонами и нейтрино. Далее приводятся выражение для эффективного гамильтониана и необходимые определения адронных формфакторов. Последующие разделы посвящены конкретным расчетам амплитуд для распадов заряженных B мезонов на три легких заряженных лептона и нейтрино. В процессе расчета учитывались как вклады промежуточных резонансов, таких как $\rho^0(770)$ и $\omega(782)$, так и влияние тормозного излучения и нерезонансного вклада от пар $\bar{b}b$. В заключительных разделах рассматриваемой главы представлены выражения для парциальных ширин и дифференциальных распределений распадов, дано обсуждение полученных численных результатов. Проведено сравнение полученных теоретических предсказаний с верхним экспериментальным ограничением на парциальную ширину распада $B \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\mu \mu^-$, установленным коллаборацией LHCb в 2019 году.

Вторая глава диссертационной работы посвящена теоретическому исследованию распадов нейтральных B мезонов на четыре легких заряженных лептона. В первой части данной главы приведено описание распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$, включая оценки парциальной ширины для данного процесса. Далее выписан эффективный гамильтониан перехода $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$, а также гамильтонианы, связанные с электромагнитным взаимодействием и слабой аннигиляцией. В последующем разделе проводится расчет амплитуд

распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$. Амплитуда данного процесса учитывает вклады резонансов $\varphi(1020)$, $\psi(3770)$, $\psi(4040)$, $\psi(4160)$, $\psi(4415)$, $\rho^0(770)$ и $\omega(782)$, а также влияние «хвостов» от состояний J/ψ и $\psi(2S)$, вклад $\bar{b}b$ пар, процессов тормозного излучения и слабой аннигиляции. В последующих разделах проведено вычисление значения парциальной ширины данного распада, обсуждаются дифференциальные распределения для распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$, оценивается влияние вклада $\varphi(1020)$ резонанса в парциальную ширину распада. Во второй части главы представлено аналогичное теоретическое исследование для распада $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$. Амплитуда данного распада учитывает вклады резонансов, таких как $\rho^0(770)$, $\omega(782)$, $\psi(3770)$, $\psi(4040)$, $\psi(4160)$ и $\psi(4415)$, а также влияние «хвостов» от резонансов J/ψ и $\psi(2S)$, пар $\bar{b}b$, процессов тормозного излучения и слабой аннигиляции. В завершении главы предоставлены численные значения парциальной ширины распада и обсуждаются дифференциальные распределения распада $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$.

В заключении приведены основные результаты работы, а также сформулированы выводы, вытекающие из проведенного исследования.

Отметим основные достоинства диссертационной работы. В работе впервые получены надежные предсказания для парциальных ширин и дифференциальных распределений продуктов распада заряженных B мезонов на три легких заряженных лептона и нейтрино, а также нейтральных B мезонов на мюонную и электронную пары. Установлена важность учета резонансных вкладов. Так для распада заряженного B мезона $B \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$ учитывались вклады промежуточных резонансов $\rho^0(770)$ и $\omega(782)$. Для распадов нейтральных B мезонов $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$ учитывалось влияние резонансов $\rho^0(770)$ и $\omega(782)$, а для распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$ были учтены вклады резонанса $\varphi(1020)$. Все расчеты были проведены также с учетом резонансных вкладов от пар $\bar{u}u$ и $\bar{c}c$, нерезонансного вклада от пары

$\bar{b}b$, а также было учтено влияние процессов тормозного излучения и слабой аннигиляции.

В диссертации достаточно подробно описаны и обоснованы используемые для проведения вычислений подходы и методы. Показано хорошее знание современного состояния исследований в данной области и владения современными методами численных расчетов.

В качестве замечаний и пожеланий укажем на следующее.

1. В диссертации сильное превышение полученного теоретического предсказания для парциальной ширины распада $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\mu \mu^+$ над экспериментальным верхним пределом объясняется необходимостью введения относительной фазы между вкладами $\rho^0(770)$ и $\omega(782)$ резонансов. Данное предположение требует дальнейшего исследования.

2. Во всех расчетах использованы только вклады основных состояний легких мезонов $\rho^0(770)$, $\omega(782)$, $\varphi(1020)$, а их радиальные возбуждения не учитываются.

3. Интересно было бы обсудить возможность наблюдения редких четырехлептонных распадов B мезонов на B фабриках.

4. На стр. 19 написано, что тензор (9) удовлетворяет условию поперечности. Однако последний вклад, учитывающий аксиальную аномалию, при умножении на q^ν в ноль не обращается.

5. На рисунках 3-6 для распада $B^- \rightarrow \mu^+ \mu^- \nu_\mu e^-$ представлены только отрицательно заряженные лептоны.

6. В подписях к рисункам 9-14 для распада с тремя мюонами нейтрино и мюон должны быть переставлены. На рисунке 18 представлены пингвины только для c кварка, а в подписи к нему речь идет о петлевых вкладах c и u кварков.

7. Замены (56) не соответствуют выражениям в приложении 3.3. В них используются другие обозначения и определения констант распада.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной ценности диссертации, а являются скорее пожеланиями по улучшению представления результатов и дальнейшему развитию исследований.

Основные результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus, WoS, RSCI, докладывались на международных и российских конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация Анны Владимировны Данилиной является законченным научным исследованием, содержащим решение актуальной научной задачи – изучения редких четырехлептонных распадов B мезонов в рамках стандартной модели. Полученные результаты имеют существенное значение для понимания динамики редких распадов мезонов. Важно отметить, что на основе проведенных исследований автором реализованы модели для Монте-Карло генератора EvtGen, которые используются коллаборацией LHCb для поиска четырехлептонных распадов и анализа экспериментальных данных.

Диссертация отвечает всем 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 несомненно 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,

главный научный сотрудник

Федерального исследовательского центра

«Информатика и управление» Российской академии наук

Галкин Владимир Олегович

27.11.2023

Контактные данные:

тел.: +79169095802, e-mail: galkin@ccas.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02 — теоретическая физика

Адрес места работы:

119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 40,

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук

Тел.: +74991350148 ; e-mail: galkin@ccas.ru

Подпись В.О. Галкина удостоверяю:

Учёный секретарь

ФИЦ «Информатика и управление» РАН

Доктор технических наук



В. Н. Захаров

27.11.2023