

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Баранова Сергея Павловича
на диссертацию Данилиной Анны Владимировны
**"Редкие четырёхлептонные распады прелестных мезонов
в Стандартной модели"**
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 –
"Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий".

Актуальность работы

Успехи так называемой Стандартной Модели в описании широко круга явлений в области физики высоких энергий позволяют рассматривать её как опорную систему координат для осмысления вновь получаемых результатов. Вместе с тем не вызывает сомнений также и неполнота Стандартной Модели, где не находится места тёмной материи, барионной асимметрии вселенной и нейтринным осцилляциям. Указанные явления с неизбежностью требуют либо расширения Хиггсовского сектора Стандартной Модели, либо расширения её калибровочной симметрии сверх обычной $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ до некоторой большей группы, либо и того и другого. Не следует также исключать и возможность существования дополнительных частиц с некалибровочной природой взаимодействий и кажущуюся пока экзотической возможность существования дополнительных пространственных измерений.

Существование ещё не открытых частиц и взаимодействий могло бы проявиться наиболее заметным образом в тех случаях, когда процесс, рассматриваемый в рамках Стандартной модели, либо запрещён какими-либо правилами отбора, либо имеет исключительно малую вероятность. Обнаружение процесса явилось бы тогда прямым индикатором "новой физики". К числу такого рода индикаторов относятся, в частности, редкие распады B -мезонов.

Актуальность работы мотивируется возможностью непосредственного

проведения измерений на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРНе в рамках коллаборации LHCb.

Задачи и предмет исследования диссертации

Предметом исследования диссертации является возможность обнаружения аномальных взаимодействий в распадах B -мезонов; задачей диссертации – вычисление ширин распадов для определённых каналов согласно Стандартной модели.

Научная новизна

В диссертации впервые получены количественные предсказания для парциальных ширин следующих распадов:

$$B^- \rightarrow l^+ l^- \bar{\nu}_l l'^-; \quad B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- l^+ l'^-; \quad B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- l^+ l'^-.$$

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ И ЕЁ ОФОРМЛЕНИЕ

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и приложения. Объём диссертации составляет 97 страниц, включая 36 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 68 наименований. Структура и объём диссертации полно и точно отражены в автореферате.

Во введении сообщаются основные теоретические положения Стандартной Модели, среди которых наибольшее внимание уделено тем, что имеют отношение к свойствам слабых взаимодействий; указывается на неполноту Стандартной Модели и на необходимость поиска иных проявлений неполноты помимо известных. Обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, указана его новизна и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются распады заряженных B -мезонов на три лёгких заряженных лептона (μ^\pm или e^\pm) и нейтрино: $B^- \rightarrow l^+ l^- \bar{\nu}_l l'^-$; в том числе рассматривается технически более сложный случай, когда среди заряженных лептонов могут быть одинаковые. Здесь приводится эффективный гамильтониан (в терминах операторного разложения и коэф-

фициентов Вильсона), общая структура амплитуд распада и явные выражения для парциальных ширин. Глава завершается получением количественных предсказаний для парциальных ширин при тождественных и нетождественных конечных лептонах.

Во второй главе рассматриваются распады нейтральных B -мезонов на две пары лёгких заряженных лептонов несопадающих ароматов. Глава содержит два подраздела, посвящённых соответственно распадам странных $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- l^+ l^-$ и нестранных мезонов $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- l^+ l^-$. Аналогично предыдущей главе, приводятся эффективные гамильтонианы распадов и явные выражения для парциальных ширин. Глава завершается получением численных оценок парциальных ширин для распадов мезонов обоих типов.

Приложение, составляющее по сути отдельную главу, содержит описание кинематики четырёхчастичного процесса; описание используемого для численного интегрирования генератора событий EvtGen; а также обширный список формул, представляющих коэффициенты в явных выражениях для парциальных ширин.

В заключении приведены основные выводы диссертации.

В качестве отдельных приложений вынесены раздел **благодарностей** и списки **рисунков** и **таблиц**.

Практическая значимость результатов

Получение количественных предсказаний Стандартной модели для трёх редких четырёхлептонных мод распада заряженных B^\pm и нейтральных B_d - и B_s -мезонов закладывает теоретический фундамент под проведение дальнейших экспериментальных исследований.

Достоверность полученных результатов и их апробация

Достоверность полученных результатов обусловлена применением надёжных, многократно проверенных и хорошо себя зарекомендовавших методов современной теоретической физики.

Результаты диссертации докладывались автором устно на международ-

ных конференциях:

- XI International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2022), Колумбари, Крит, Греция, 30 августа - 11 сентября 2022;
- International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology, Дубна, ОИЯИ, Россия, 17-22 июля 2022;
- 10th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2021), Colymbari, Crete, Greece, Греция, 23 августа - 2 сентября 2021;
- Ломоносовские Чтения 2021, секция физики высоких энергий, Москва, НИИЯФ МГУ, Россия, 20-29 апреля 2021;
- The XXIV International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'2019), г. Сочи, Россия, 22-29 сентября 2019;
- QUARKS-2018 20th International Seminar on High Energy Physics, Valday, Russia, Россия, 27 мая - 2 июня 2018;
- Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике ИТЭФ, (г. Москва, 26 - 29 ноября 2018 г.);
- The XXIII International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'2017), г. Ярославль, Россия, 26 июня - 3 июля 2017;
- Ломоносовские Чтения 2017, секция физики высоких энергий, Москва, НИИЯФ МГУ, Россия, 17.04.2017

Вклад автора в получение результатов

Основные результаты, представленные в диссертации, получены лично автором. Автор принимал непосредственное участие в постановке и решении задач, а также в подготовке статей к публикации.

Материалы диссертации опубликованы в семи печатных работах (научных журналах, индексируемых в базах SCOPUS, WEB OF SCIENCE, RSCI).

Исследования отмечены следующими наградами:

- Академическая премия от Фонда развития теоретической физики и математики «Базис» для аспирантов и молодых ученых без степени, Россия (г. Москва, 2018 - 2020 гг.);

- Olga Igonkina Scholarship 2021 (NIKHEF, Нидерланды, 2021 г.);
- Премия по Программе развития МГУ, (г. Москва, 2020 - 2022 гг.);
- Диплом по итогам молодежного конкурса научно-исследовательских работ НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ (г. Москва, 2018 – 2021 гг.).

ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАБОТЕ

- Наиболее существенное из моих замечаний не является в строгом смысле слова критическим, а представляет скорее пожелание на будущее. "Разбор полётов" остаётся неполным, пока не рассмотрены четырёхчастичные распады с тождественными лептонами: $B \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ и $B \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$. Понятно впрочем, что такие расчёты поднимают задачу на качественно иной уровень сложности.
- В отношении порядка представления результатов, мне не хватило логической перемички между стандартными выражениями для тормозного излучения (привычный и ожидаемый вид которых был бы сходен со вторым слагаемым в нумерованной формуле внизу страницы 23) и формулами (42), (43). Формулы вероятнее всего правльные, но переход к ним требует некоторых математических преобразований, может быть не очень коротких. Моя работа как читателя и оппонента сильно бы облегчилась, если бы нужные преобразования были приведены в явном виде (например вынесены в отдельное приложение, как это было сделано с другими громоздкими формулами).
- В отношении самой этой формулы на стр. 23 также есть два замечания:
 - нет ли тут опечатки: не следует ли во втором слагаемом $(\hat{p} + m_\nu)$ читать как $(\hat{p} - \hat{k}_3 + m_\nu)$?
 - уместно ли терминологически относить первое слагаемое к тормозному излучению? (А это собственно излучение от какой частицы?) Я бы скорее назвал это слагаемое контактным членом, т.к. его структура соответствует диаграмме с тройной вершиной $BW\gamma$. В "ортодоксальном" тормозном излучении было бы привычнее видеть кусочек лептонного пропагатора.

- Все остальные замечания носят сугубо косметический характер. Как то:
 - на стр. 15 делается преждевременное (априори не очевидное) утверждение о доминантном вкладе $\rho(770)$ и $\omega(782)$ резонансов в распад $B \rightarrow \mu^+ \mu^- \bar{\nu}_e e^-$. Лучше было бы сказать 'предположим' или 'принимая во внимание только вклад...';
 - на стр. 22 обозначение \mathcal{A} удобнее раскрыть сразу же, а не откладывать до стр. 24;
 - однотипные рисунки 3 и 6 можно было бы объединить или заменить одним, сопроводив пояснением, что лептоны l и l' могут быть как тождественными, так и различными;
 - на стр. 46 величина $f^{(VP)}$, упоминаемая в тексте после формулы (43), должна читаться как $f^{(VT)}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Анны Владимировны Данилиной "Редкие четырёхлептонные распады прелестных мезонов в Стандартной модели" представляет собой полноценное научное исследование, устанавливающее предсказания Стандартной модели для редких четырёхлептонных распадов прелестных мезонов: $B^- \rightarrow l^+ l^- \bar{\nu}_l l'^-$, $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- l^+ l^-$.

Диссертация основана на работах, опубликованных в реферируемых высокорейтинговых журналах. Основные её результаты докладывались автором на семинарах, рабочих совещаниях и международных конференциях. Выводы диссертации обоснованы, полностью соответствуют поставленной задаче и логично вытекают из проведённой работы. Все выносимые на защиту результаты получены при определяющем вкладе самого автора. Автореферат полно и ясно отражает содержание диссертации. Полученные диссертантом результаты могут использоваться в ИТЭФ, ИФВЭ, ИЯИ, НИИЯФ, ПИЯФ, ОИЯИ, ФИАН, а также других научных центрах России, Европы, Азии и США.

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."

Указанные в настоящем отзыве замечания не умаляют достоинств диссертационного исследования и не снижают его ценности. 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, главный научный сотрудник
Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН

Баранов Сергей Павлович *Баранов* 23.11.2023

Контактные данные:

Тел.: (916) 192 0988 e-mail: baranovsp@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.16 – "Физика атомного ядра и элементарных частиц"

Место работы:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук,
Отделение ядерной физики и астрофизики.

119991 Москва, Ленинский проспект 53,

Тел.: (499) 132 6317, e-mail: baranovsp@lebedev.ru

Подпись сотрудника ФИАН С.П.Баранова удостоверяю,
заместитель директора ФИАН

С.Ю.Савинов



23.11.23