

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Шоркина Романа Андреевича *«Исследование лептонной универсальности в распадах В-мезонов на Большом адронном коллайдере»*, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Поиск Новой физики (НФ) или новой теории за рамками Стандартной модели (СМ) является главнейшим направлением современных исследований в физике элементарных частиц. На необходимость существования НФ указывают внутренние проблемы Стандартной модели и ряд экспериментальных наблюдений. Новая физика может проявляться в виде новых тяжелых объектов, новых взаимодействий на очень малых расстояниях, в виде новых легких частиц со сверхслабым взаимодействием с частицами СМ.

Диссертационная работа Шоркина Романа Андреевича *«Исследование лептонной универсальности в распадах В-мезонов на Большом адронном коллайдере»* посвящена этой актуальной проблеме современной физики высоких энергий – поиску проявлений физики за пределами Стандартной модели посредством прецизионных измерений редких распадов В-мезонов.

Одним из перспективных направлений исследований проявления НФ является измерение отклонений характеристик редких процессов от предсказаний Стандартной модели. Очень интересным является изучение нейтральных токов с нарушением аромата, а также распадов с нарушением лептонной универсальности. К таким процессам относятся, в частности, распады прелестных мезонов, включающие переход $b \rightarrow s$ на кварковом уровне. Особый интерес вызывает изучение аномалий в распадах $b \rightarrow s l^+ l^-$.

Поэтому, представленный результат измерения параметра лептонной универсальности в распадах $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ в кинематической области, ранее не изучавшейся на адронном коллайдере, является **актуальным** и важным этапом проверки аномалий и наложении ограничений на возможные модели новой физики.

С учетом всего сказанного, **важность** и **актуальность** результатов, полученных Шоркиным Р.А., не вызывает сомнения.

Следует отметить **научную новизну** работы:

1. *Впервые* выполнено прецизионное измерение параметра R_K в кинематической области над чармониевыми резонансами ($q^2 > 14.3 \text{ ГэВ}^2 / c^2$) на данных сотрудничества LHCb. На настоящий момент полученное значение $R_K = 1,079^{+0,114}_{-0,100}$ является наиболее точным для указанной области.

2. Впервые проведено исследование распада $B(d,s) \rightarrow K^0_s K^*(892)^0$ в данных, полученных сотрудничеством LHCb в ходе 1-го и 2го сеанса работы на Большом адронном коллайдере.

3. Разработан новый метод анализа состава выведенного адронного пучка с использованием отклика одиночного модуля электромагнитного калориметра типа «шашлык».

4. Важным результатом является анализ применимости BDT (Boosted Decision Tree) для отбора редких событий в условиях преобладающего фона.

Научная значимость работы обусловлена высокой ценностью выполненного измерения параметра R_K . Полученный результат является модельно-независимым, позволяет уточнить результаты более ранних измерений, а также вносит важный вклад в глобальные подгонки коэффициентов Вильсона в рамках формализма эффективной теории поля Стандартной модели. Более того, как показано автором, измерение этого параметра (отношения) позволяет существенным образом уменьшить величину систематической ошибки.

Практическая значимость работы состоит в разработанных методиках анализа экспериментальных данных; предложенном методе анализа состава адронного пучка, применимым в тестах на выведенных пучках; проведенном авторе анализе методов машинного обучения.

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем диссертации объем составляет 183 страницы, включая 56 рисунков и 37 таблиц. Список источников включает в себя 167 наименований.

Введение содержит краткую характеристику тематики исследования, обосновывается ее актуальность, формулируются цели и задачи работы. Обсуждаются научная новизна, практическая ценность и выносимые на защиту основные положения. Обоснована достоверность результатов, дана исчерпывающая информация о личном вкладе диссертанта.

В **первой** главе диссертации кратко описываются основные положения Стандартной модели. Подробно рассматривается формализм эффективной теории поля для описания распадов, протекающих посредством нейтрального тока с изменением аромата. В частности, приводится детальное описание вычислений форм-факторов мезонов.

Во **второй** главе приводится обзор актуальных экспериментальных результатов по исследованию лептонной универсальности в распадах B -мезонов.

В **третьей** главе приведено подробное описание эксперимента LHCb.

Четвертая глава посвящена описанию выполненного измерения параметра лептонной универсальности R_K . Подробно объясняется процедура выделения электрон-позитронной пары и сопутствующие погрешности. Детально проанализированы различные источники систематических ошибок.

В **пятой** главе приведено описание исследования распадов $B(d,s) \rightarrow K^0_s K^*(892)^0$ в данных, полученных сотрудничеством LHCb на Большом адронном коллайдере.

Шестая глава посвящена описанию проведенных методологических исследований: изучению идентификации частиц при помощи модуля электромагнитного калориметра LHCb и оптимизации отбора редких событий при помощи классификаторов в условиях неопределенного фона.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Автореферат работы полностью отражает ее содержание. Он написан хорошим языком, материал излагается последовательно и в достаточном для понимания объеме.

К несомненным достоинствам диссертационной работы Шоркина Р.А. можно отнести следующие:

1. Диссертация написана ясным языком, структура и содержание логичны и последовательны. Практически все положения хорошо и подробно обоснованы. Следует также отметить хорошее понимание автором теоретических моментов, используемых при анализе и интерпретации данных.
2. Методология описанного анализа распадов $B^{+/-} \rightarrow K^{+/-} l^+ l^-$ тщательно и детально проработана.
3. Следует отметить (Глава 2) подробное описание текущих измерений и хорошее обоснование выбора области измерений R_K . Детально описан выбор измеряемых параметров и обоснован выбор наиболее оптимальных.
4. Значимым результатом является подробное описание процедуры учета погрешностей при восстановлении инвариантной массы $e^+ e^-$ пары.

5. Особое внимание в Главе 4 уделено описанию систематических ошибок в полученном значении параметра R_k .
6. Следует отметить, что представленные результаты охватывают несколько областей экспериментальной физики: анализ данных сотрудничества LHCb, эксперимент на тестовых пучках и модельное исследование методов компьютерной обработки.

К замечаниям можно отнести следующие:

Введение

с. 5 "... верное предсказание эффектов, невозможных в СМ". Более точно: "... невозможных в СМ или резко отличающихся от предсказаний СМ"

"... амплитуда процесса в СМ должна быть значительно подавлена". Это не обязательно. Главное, чтобы точность измеренной величины изучаемом в процессе была бы менее или сравнимой с предсказаниями НФ.

Глава 1

с. 23 в формуле (1.50) следовало бы указать ссылку на параметризацию матрицы ККМ.

В этой главе следовало бы упомянуть, что нейтральные токи с нарушением лептонного числа запрещены в СМ в любом порядке теории возмущений

В разделе 1.3.1 (с. 27) несколько неудачная формулировка "... Λ – энергетический масштаб, физическое описание которого может быть сведено к эффективной вершине". Можно более просто: « Λ – характерный масштаб Новой физики»

Глава 2

В Таблице 10 на с. 55 опечатка: вместо « ab^{-1} » необходимо; « pb^{-1} » .

Глава 4

Вопросы ко всей главе 4. Какое число отобранных событий ? При отборе сигнальных событий электронного канала $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$ используется вето-критерий $m(Ke) > 1885$ МэВ, хотя эффективность этого критерия по отношению к сигналу в исследуемой кинематической области представляется довольно низкой. Чем обоснован выбор этого критерия?

с. 72 «Моделирование событий достаточно точно передает корреляцию между переменными q^2 и q^2_{track} ». Какой тип корреляции ?

с. 73 «Эти процессы, проходящие на древесном уровне в СМ, ...» слэнговое выражение. Лучше было бы «..., хорошо описывающиеся в рамках СМ ...»

с. 74 В формуле (4.3) верхний предел в интеграле лучше указать q_{\max}^2 , а не «бесконечность»

с. 80 Утверждение во фразе «...поскольку распады $J/\psi \rightarrow h^+ h^-$ и $\psi(2S) \rightarrow h^+ h^-$ запрещены.» - не корректное. Например, распады на протон и антипротон имеют вероятности распадов тира $10^{-3} - 10^{-4}$

с. 82 «должна быть на значительном удалении от любой первичной вершины протон-протонного взаимодействия» - на каком (числовая характеристика) ?

с. 84 «... на инвариантную массу трека...» - что такое инвариантная масса трека ?

с. 91 «...разница в количестве вещества детектора в модели и действительности ...». В модели возможно задать массу соответствующую действительности ?

Глава 5

с. 115 пропущен глагол в предложении “По этой причине особый интерес оптимизированные параметры, ...”

с. 148 «...представленные на Рис. 5.12 и 5.12...» - это опечатка. Должно быть «на Рис. 5.12 и 5.13»

Глава 6 с. 151 «два сеанса набора данных с на адронных» лишняя буква «с»

Однако, указанные замечания **никоим образом не снижают** общую высокую ценность работы, достоверность и важность полученных автором результатов.

В целом диссертация Шоркина Р.А. представляет законченное научное исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне. Материал излагается подробно, основные научные предположения хорошо обоснованы. Изложенные в диссертации результаты **достоверны**, что обеспечивается использованием методов контроля набора данных и работы экспериментальной установки ЛНСб, а также применением стандартных современных методов обработки. **Апробация** выносимых на защиту положений достаточна полна и включает в себя 3 публикации в

рецензируемых журналах, включенных в список ВАК, а также выступления на научных конференциях. **Личный вклад** автора в получение представленных в тексте результатов является определяющим и не вызывает сомнений.

На основании полученных диссертантом результатов, сделанных выводов и выдвинутых научных положений следует считать, что поставленная цель исследований успешно достигнута. Диссертационная работа Шоркина Романа Андреевича «Исследование лептонной универсальности в распадах B -мезонов на Большом адронном коллайдере» является законченной научно-квалификационной работой. Работа соответствует заявленной специальности и удовлетворяет требованиям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней № 842, утвержденным Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Отзыв составил

Официальный оппонент:

СЛАБОСПИЦКИЙ Сергей Ростиславович

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного учреждения «Институт
физики высоких энергий им. А. А.
Логанова Национального
исследовательского центра «Курчатовский
институт»,



/Слабоспицкий С.Р.

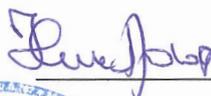
« 4 » Июль 2020 г.

Тел.: 8 (4967) 74-28-24, e-mail: sergey.slabospitsky@ihep.ru

Адрес места работы: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, д. 1

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Слабоспицкого Сергея Ростиславовича удостоверяю:

Ученый секретарь,
кандидат физико-математических
наук
Н.Н. Прокопенко

 /Прокопенко Н.Н.



Список основных публикаций официального оппонента доктора физико-математических наук Слабоспицкого С.Р. по тематике диссертации Шоркина Р.А. «Исследование лептонной универсальности в распадах В-мезонов на Большом адронном коллайдере» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Hayrapetyan, A., ..., Slabospitsky, S. et al. (CMS Collaboration), *Angular analysis of the $B^0 \rightarrow K^*(892)^0 \mu^+ \mu^-$ decay in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* // Phys. Lett. B. 2025. – 864 (2025) 139406
2. Hayrapetyan, A., ..., Slabospitsky, S. et al. (CMS Collaboration), *Test of lepton flavor universality in semileptonic B_c^+ meson decays in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* // Phys. Rev. D. 2025. – 111 (2025) 5, L051102
3. Hayrapetyan, A., ..., Slabospitsky, S. et al. (CMS Collaboration), *Test of lepton flavor universality in $B^\pm \rightarrow K^\pm \mu^+ \mu^-$ and $B^\pm \rightarrow K^\pm e^+ e^-$ decays in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* // Rept. Prog. Phys. 2024. – 87 (2024) 7, 077802
4. Hayrapetyan, A., ..., Slabospitsky, S. et al. (CMS Collaboration), *Measurement of the $B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ effective lifetime from proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* // JHEP. 2024. – 10 (2024) 247
5. Hayrapetyan, A., ..., Slabospitsky, S. et al. (CMS Collaboration), *Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay properties and search for the $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* // Phys. Lett. B. 2023. – 842 (2023) 137955
6. Hayrapetyan, A., ..., Slabospitsky, S. et al. (CMS Collaboration), *Observation of $B^0 \rightarrow \psi(2S) K_S^0 \pi^+ \pi^-$ and $BB_S^0 \rightarrow \psi(2S) K_S^0$ decays* // Eur. Phys. J. C. 2022. – 82 (2022) 499
7. Slabospitskii, S. *Top-quark decay into Upsilon-meson* // Phys. Lett. B. 2021 – 822 (2021) 136704
8. Slabospitsky, S.R. *Rare Top-Quark Decay $t \rightarrow b\bar{b}W^+$* // Phys. Atom. Nucl. 2023. – 86 (2023) 1149-1156