

ОТЗЫВ

**официального оппонента Куденко Юрия Григорьевича
на диссертацию Шматова Сергея Владимировича
«Исследование процессов парного рождения мюонов в
эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере»,
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 01.04.16 –
физика атомного ядра и элементарных частиц**

Диссертационная работа С.В. Шматова посвящена исследованию рождения пар мюонов с высокими энергиями в области инвариантных масс 1-5 ТэВ. В работе изучаются возможности эксперимента CMS по поиску дополнительного нейтрального калибровочного бозона через распад $Z' \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и возможности тестирования различных моделей расширенного калибровочного сектора. В диссертации выполнены исследования по множественному рождению адронных струй, а также лептонов с близким к изотропному распределению в пространстве и получены новые ограничения на ряд моделей расширенного калибровочного сектора и моделей многомерной низкоэнергетической гравитации. Получены новые ограничения на параметры четырехмерных гравитонов, ограничения на параметры моделей, образования микроскопических черных дыр. Исследования, описанные в диссертации, проводились с использованием современных методов физики высоких энергий и современных теоретических моделей. Актуальность и новизна этих исследований, достоверность полученных результатов не вызывает сомнений

Во Введении диссертации представлена мотивация, обоснована актуальность и научная значимость выполненных автором исследований. Дан краткий обзор основных проблем, на решения которых была направлена эта работа. Также изложены цель работы, новизна, практическая значимость, личный вклад автора и структура диссертации.

Первая Часть диссертации посвящена исследованиям возможностей эксперимента CMS по поиску новой физики при измерении процессов Дрелла-Яна при энергии 14 ТэВ. В Главе 1 дано краткое описание эксперимента CMS. Изложены основные требования к детекторным системам CMS, исходя из физических задач эксперимента. Даны общие характеристики детекторных систем: трекер, электромагнитный калориметр, предливневый детектор, адронный калориметр, мюонная система, триггерная система. Показано, что параметры установки соответствуют задаче прецизионных измерений импульсов заряженных частиц.

В Главе 2 представлено детальное описание моделирования физических процессов, реконструкции и отбора событий. Моделирование отклика установки было выполнено с использование пакета программ GEANT4. Подробно изложена процедура реконструкции мюонных треков с использование информации трекера и мюонной системы. Получена

эффективность реконструкции мюона в диапазоне 95-99%, за исключением нескольких областей псевдобыстрот. Это результат отражает структуру мюонной системы. Эффективность восстановления инвариантной массы димюонных событий составила более 97% для масс более 200 МэВ. Были получены комбинированная эффективность триггера и реконструкции более 93% и разрешение инвариантной массы менее 5%.

Глава 3 посвящена изучению процессов Дрелла-Яна и возможностям предсказаний Стандартной Модели. Была продемонстрирована возможность измерения сечения рождения пары мюонов и проанализированы возможные статистические и систематические погрешности. Были учтены погрешности, связанные с детектором, и неточности расчета сечения Дрелла-Яна (неточное знание функций распределения кварков и глюонов, погрешность бегущей константы связи КХД и др.) Также были выполнены исследования теоретических ошибок расчета сечения рождения струй КХД. Были исследованы методы измерения пространственной асимметрии влета лептонов.

Глава 4 посвящена обсуждению возможностей обнаружения новой физики в каналах с парой мюонов в конечном состоянии. Были рассмотрены нерезонансные сигналы и узкие резонансы со спином 1 и спином 2. Изложены методы статистического анализа для этих случаев. Также обсуждается возможность наблюдения сигналов от многомерной гравитации. Анализируются предсказания расширенных калибровочных моделей, выполнены расчеты процессов рождения и распадов бозонов Z' . Показано что достижимо наблюдение Z' бозона с массами до 4.4 ТэВ в режиме высокой светимости ускорителя.

В Части 2 диссертации представлены исследования процессов с образованием пар мюонов и многочастичных событий в столкновениях протонов при энергиях $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ. В Главе 5 приводятся результаты измерений пар мюонов и электронов и многочастичных событий в эксперименте CMS во время измерений 2009-2012 при энергиях сталкивающихся протонов при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ. Было выполнено моделирование сигналов и основных фоновых процессов. Показано, что при небольших инвариантных массах суммарный вклад фоновых процессов не превышает 5% для обоих лептонных каналов и увеличивается до 30% при увеличении масс. Детально обсуждается реконструкция и отбор пар мюонов триггерной системой, а также методы корректировки систематических эффектов. Приведены результаты измерений дифференциальных сечений, сечений рождения Z^0 бозона, измерений пространственной асимметрии вылета лептонов, измерения параметра смешивания слабого взаимодействия $\sin^2\theta_{\text{eff}}$.

Глава 6 посвящена поиску новой физики за рамками Стандартной Модели за счет исследования возможных резонансных состояний со спином 1 и спином 2 и нерезонансных состояний. Поиск резонансных состояний проводился помостью восстановления инвариантной массы пар лептонов. Описана процедура поиска сигнала, представлены систематические погрешности и получены верхние пределы на резонансные и нерезонансные состояния в широком диапазоне масс. В Главе 7 исследовались процессы множественного рождения частиц при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ, а также проводился поиск сигналов от микроскопических многомерных черных дыр и квантовых черных дыр. Основная подход поиска таких сигналов базируется на ожидаемой сферичности (отсутствием выделенной оси) событий. Выполнено

моделирование микроскопических черных дыр, выполнены расчеты сечений для разных моделей. Описана реконструкция струй и анализ данных. Рассмотрен метод оценки фоновых событий, представлены результаты определения систематических погрешностей и приводятся результаты измерений. Получены ограничения на сечения множественного рождения частиц, отклонения от предсказаний Стандартной Модели не обнаружено. Получены верхние пределы на уровне 95% CL на сечения образования квазиклассических и квантовых микроскопических черных дыр. В четырех приложениях диссертации представлен ряд полученных результатов. В Заключении диссертации сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Следует подчеркнуть следующие наиболее важные результаты, представленные в диссертации. В первую очередь необходимо отметить, что С.В.Шматовым предложена и детально разработана программа поиска различных эффектов за рамками Стандартной Модели, которые могут быть обнаружены при измерении кинематических параметров пары мюонов в конечном состоянии, образующихся при $\sqrt{s} = 14$ ТэВ в системе центра масс. Автором впервые была продемонстрирована возможность измерения сечения процесса Дрелла-Яна в области инвариантных масс до нескольких ТэВ и измерены эти сечения. Впервые была показана возможность наблюдения сигналов от многомерной гравитации, которые предсказываются моделью с большими дополнительными измерениями. С.В.Шматов обосновал возможность наблюдения тяжелых резонансных состояний со спинами 1 и 2 и разработал методику их поиска. В работе получены новые данные о взаимодействии частиц при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ, измерены дифференциальные и дважды дифференциальные сечения процесса Дрелла-Яна. С наилучшей точностью были измерены инклузивные сечения рождения Z^0 бозона. Получены ограничения на сечения множественного рождения частиц и дана интерпретация для различных моделей образования квазиклассических и квантовых микроскопических черных дыр. В работе получен ряд фундаментальных результатов, которые в значительной степени определяют направления экспериментальных исследований на LHC.

В работе можно было бы отметить следующие недостатки. 1. На стр. 7 диссертации перечислены явления, которые не описываются Стандартной Моделью. Представляется, что пропущен важный результат, не находящий объяснения в Стандартной Модели, а именно, наличие ненулевой массы нейтрино. 2. В главе 5, раздел 5.4, рассмотрены источники систематических погрешностей при измерении сечений процесса Дрелла-Яна. Фон дает доминирующий вклад в систематику для моды распада e^+e^- для масс >200 ГэВ при $\sqrt{s}=8$ ТэВ, и ошибка, связанная с фоном, является самой большой из приведенных в таблице 5.24. Полагаю, что пояснению этой систематической погрешности следовало бы уделить больше внимания. 3. В определение асимметрии «вперед-назад» в процессе Дрелла-Яна используется полярный угол θ^* , который определен на рис.3.69. Однако на этом рисунке показан угол θ . 4. В тексте несколько раз указывается, что полученные данные хорошо согласуются с данными эксперимента ATLAS, однако не удалось обнаружить ни одной цифры, рисунка или таблицы, подтверждающих эти выводы. 5. Структура диссертации не очень оптимальна. Было бы лучше сразу за главами 1 и 2 расположить главы 5, 6 и 7 с результатами измерений при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ. А главы 3 и 4, посвященные перспективам исследований при энергии 14 ТэВ, поместить после полученных результатов при более

низких энергиях. 6. Есть замечания к использованию терминологии. Например, на стр.238 “Робастность используемого метода...”. На стр. 278 “Модельно-независимым способом проведены измерения верхних пределов (95% CL) сечений процессов множественного рождения...”

Упомянутые недостатки и замечания не влияют на общую оценку работы. Диссертационная работа С.В. Шматова выполнена на высоком научном уровне, решает актуальные научные задачи физики элементарных частиц. В работе предложена, сформулирована и выполнена широкая программа исследований в канале с парой мюонов высоких энергий в конечном состоянии. Автореферат диссертации и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Они хорошо согласуются с результатами эксперимента ATLAS. Основные результаты, в которых получены ограничения на различные расширения Стандартной Модели, включены в обзоры (таблицы) Particle Data Group. Все научные результаты диссертации опубликованы в статьях автора в рецензируемых научных изданиях и представлены им на различных Международных конференциях от имени коллаборации CMS.

Принимая во внимание вышеизложенное, считаю, что рассмотренная диссертация С.В. Шматова «Исследование процессов парного рождения мюонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере» безусловно соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Сергей Владимирович Шматов заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

4 октября 2019 г.

Официальный оппонент

Куденко Юрий Григорьевич,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.16 “Физика атомного ядра и элементарных частиц”,
профессор, заведующий Отделом физики высоких энергий,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук,
117312 Москва, проспект 60-летия Октября, 7а
Телефон: +7 (499)135-77-60, +7 (903) 615-91-25,
E-mail: kudenko@inr.ru

Подпись Куденко Ю.Г. удостоверяю:

Зам. директора ИЯИ РАН,
д.ф.м.н. Максим Валентинович Либанов



Список основных публикаций за 2014 – 2019 годы

доктора физико-математических наук, профессора, заведующего Отделом физики высоких энергий ФГБУН Института ядерных исследований РАН Куденко Юрия Григорьевича по теме диссертации Шматова Сергея Владимировича «Исследование процессов парного рождения мюонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц».

1. E. Cortina Gil, ..., Y. Kudenko et al, “Search for heavy neutral lepton production in K^+ decays”, Phys. Lett. B **778** (2018) 137.
2. K. Abe, ..., Y. Kudenko et al, “Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with 2.2×10^{21} Protons on Target”, Phys. Rev. Lett. **121** (2018) 171802.
3. A.S. Sadovsky..., Y. Kudenko et al, “Search for heavy neutrino in $K^+ \rightarrow \mu + vH$ decays”, Eur. Phys. J. C **78** (2018) 92.
4. K. Abe, ..., Y. Kudenko et al, “First measurement of the $v\mu$ charged-current cross section on a water target without pions in the final state”, Phys. Rev. D **97** (2018) 012001.
5. R. Volpe, ..., Y. Kudenko et al, “Search for $K^+ \rightarrow \pi^+ vv$ at NA62”, Nucl. Part. Phys. Proc. **282** (2017) 101.
6. K. Abe, ..., Y. Kudenko et al, “Search for Lorentz and CPT violation using sidereal time dependence of neutrino flavor transitions over a short baseline”, Phys. Rev. D **95** (2017) 111101.
7. K. Abe, ..., Y. Kudenko et al, “Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino”, Phys. Rev. Lett. **118** (2017) 151801.
8. K. Abe, ..., Y. Kudenko et al, “First measurement of the muon neutrino charged current single pion production cross section on water with the T2K near detector”, Phys. Rev. D **95** (2017) 012010.
9. K. Abe, ..., Y. Kudenko et al, “Measurement of Muon Antineutrino Oscillations with an Accelerator-Produced Off-Axis Beam”, Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 181801,
10. Y. Kudenko, “Neutrino Physics: Status and Open questions”, Nucl. Part. Phys. Proc. **260** (2015) 167.
11. A.V. Abramov, ..., Y. Kudenko et al, “Search for heavy neutrino in $K^+ \rightarrow \mu + vH$ decays”, Phys. Rev. D **91** (2015) 052001.
12. A.T. Shaikhiev, Yu.G. Kudenko, “New results on sterile neutrinos searches”, Phys. Atom. Nucl. **78** (2015) 1591.
13. K. Abe, ..., Y. Kudenko et al, “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 061802.
14. K. Abe, ..., Y. Kudenko et al, “Measurement of the Inclusive Electron Neutrino Charged Current Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector”, Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 241803.
15. Yu.G. Kudenko, “Long-baseline neutrino accelerator experiments: results and prospects”, Usp. Fiz. Nauk **184** (2014) 502.