



«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор  
Московского государственного  
университета имени М. В. Ломоносова  
профессор А. А. Федянин

13 октября 2019 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию Шматова Сергея Владимировича «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПАРНОГО РОЖДЕНИЯ МЮОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Основой современных представлений физики высоких энергий является Стандартная Модель (СМ) электрослабых и сильных взаимодействий. Расчеты, основанные на этой модели, успешно описывают огромное количество накопленных экспериментальных результатов. Для полного подтверждения СМ было необходимо найти экспериментальные доказательства существования бозона Хиггса - частицы, ответственной за нарушение электрослабой симметрии и придание масс элементарным частицам. Новый бозон с массой около 125 ГэВ был действительно открыт на Большом Адронном Коллайдере (БАК, LHC), но предстоит еще большая работа по изучению его свойств. Есть также указания на существование новой физики за пределами СМ. Так, для стабилизации вычислений массы самого бозона Хиггса и для объяснения природы темной материи, ведутся поиски суперсимметричных частиц. Есть также много других моделей, предсказывающих существование новых частиц и явлений в достижимой области энергий. Прецизионное тестирование СМ и поиски новой физики за её пределами будут продолжены на LHC до ~2035г. Планируется также продолжить эти исследования на новых лептонных и адронных коллайдерах.

В диссертационной работе С.В. Шматова представлен обширный цикл исследований парного рождения мюонов и поисков микроскопических черных дыр на LHC. Результаты работы опубликованы в 32 журнальных статьях, из которых 13 являются официальными публикациями коллаборации CMS, и включены в мировые таблицы Particle Data Group. Ряд измерений был выполнен впервые на основе оригинальной методики, разработанной автором диссертации. Результаты диссертационной работы используются для новых измерений на LHC при увеличенных энергиях протон-протонных столкновений и больших светимостях. Эти результаты будут использоваться на следующих этапах работы LHC и коллайдерах нового поколения. Таким образом, актуальность, научная новизна, практическая ценность и высокая значимость для развития физики высоких энергий работы представленной в диссертации не вызывает сомнений.

Диссертационная работа представляет собой объемный законченный труд в виде введения, семи глав в составе двух частей, заключения и пяти приложений с дополнительными материалами. Диссертация представлена на 329 страницах, включая 194 рисунка и 46 таблиц. В диссертации 277 ссылок на литературу, многие из которых содержат



более одной статьи.

Во введении представлена мотивация данной работы, включающая небольшой теоретический обзор рассматриваемых процессов. Также во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и научная новизна исследования, обоснована практическая значимость работы и обозначен личный вклад автора в полученные результаты.

Основное содержание диссертационной работы разбито на две части, первая (главы 1-4) из которых посвящена разработке программы исследования процессов двух-мюонного рождения в протон-протонных столкновениях при  $\sqrt{s} = 14$  ТэВ, а во второй (главы 5-7) представлены измерения двух-мюонного рождения и изучение процессов множественного рождения жёстких частиц при  $\sqrt{s} = 7$  и 8 ТэВ.

В первой главе приведены основные характеристики многоцелевого детектора CMS, установленного в одной из точек пересечения пучков коллайдера LHC. Во второй главе детально обсуждаются все аспекты изучения событий с одним и двумя мюонами. Специальное внимание при этом уделено работе с мюонами с большими поперечными импульсами. Продемонстрирована практическая осуществимость изучения мюонных пар с инвариантными массами до нескольких ТэВ.

Третья глава посвящена методике проверки предсказаний СМ для рождения мюонных пар в процессе Дрелл-Яна. Представлена разработанная методика подавления фоновых процессов и оценки систематических погрешностей. Продемонстрирована возможность измерения сечения процесса Дрелл-Яна, а также угловых характеристик и пространственной асимметрии вылета мюона, в области инвариантных масс до нескольких ТэВ.

В четвёртой главе представлен анализ перспектив обнаружения сигналов новой физики резонансного и нерезонансного характера в рождении пар мюонов в протон-протонных столкновениях при  $\sqrt{s} = 14$  ТэВ. Также в этой главе описана разработанная методика поиска резонансов со спином 1 и 2.

В пятой главе описано измерение характеристик рождения пар лептонов в процессе Дрелл-Яна в протон-протонных столкновениях при  $\sqrt{s} = 7$  и 8 ТэВ. Представлены измерения дифференциальных (по массе) и дважды-дифференциальных (по массе и быстрой) сечений рождения пар лептонов и инклюзивных сечений рождения  $Z^0$  бозона. Также описаны измерение пространственной асимметрии вылета лептонов и измерение параметра смешивания слабого взаимодействия  $\sin^2\theta_{eff}$ .

Шестая глава посвящена поискам новой физики в рождении пар мюонов. Описаны поиски дополнительного  $Z'$  бозона и калуца-клейновских возбужденных состояний гравитона  $G_{KK}$ , а также поиск нерезонансных сигналов от процессов с обменов гравитоном. Установлены верхние пределы на проявления протестированной новой физики.

В седьмой главе представлено изучение процессов множественного рождения жёстких частиц и поиски сигналов рождения микроскопических черных дыр. Описано модельно-независимое измерение верхних пределов на сечения процессов множественного рождения жёстких частиц. Представлено измерение верхних пределов на сечения образования квазиклассических и квантовых микроскопических черных дыр, а также "струнных шаров".

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

Все результаты, выносимые автором на защиту, в полной мере представлены в основных публикациях, указанных в автореферате. Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов моделирования и анализа данных, а также хорошим согласием результатов, представленных в публикациях коллаборации CMS, с результатами коллаборации ATLAS. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.



Небольшое количество опечаток и неточностей в тексте диссертации не создаёт проблем для её понимания. В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. Из 19 электронных препринтов, отнесённых автором к основным публикациям, 9 являются внутренними нотами коллаборации CMS и недоступны внешним читателям. Было бы правильнее не включать эти ноты в основные публикации и отметить в тексте их неполную доступность.
2. Изучение множественного рождения жёстких частиц, в том числе поиски рождения микроскопических черных дыр, не отражены в названии диссертации. Включение этих интересных исследований в состав диссертационной работы выглядит несколько искусственным.
3. В списке литературы есть две ссылки на разные издания "Particle Data Group", что послужило источником небольшой путаницы. На страницах 250 и 278 вместо ссылки [134] следовало указать ссылку [244].

Отмеченные выше недостатки не влияют на положительную оценку диссертационной работы, которая является глубоким и детальным научным исследованием. Автор существенно развил методику исследований двух-мюонного рождения в коллайдерных экспериментах, провёл цикл измерений и всесторонне проанализировал полученные результаты. Совокупность представленных в диссертации результатов можно оценить как новое крупное научное достижение в развитии физики высоких энергий.

По своей актуальности, новизне полученных результатов и важности научных выводов диссертация Шматова С.В. «Исследование процессов парного рождения мюонов в эксперименте CMS на большом адронном коллайдере» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 год № 335. Шматов Сергей Владимирович полностью заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв составил: доктор физ-мат. наук  
заведующий лабораторией тяжёлых частиц и резонансов  
Отдела экспериментальной физики высоких энергий  
НИИЯФ МГУ  
Тел.: (495)9393568, Эл. адрес: gladilin@sinp.msu.ru

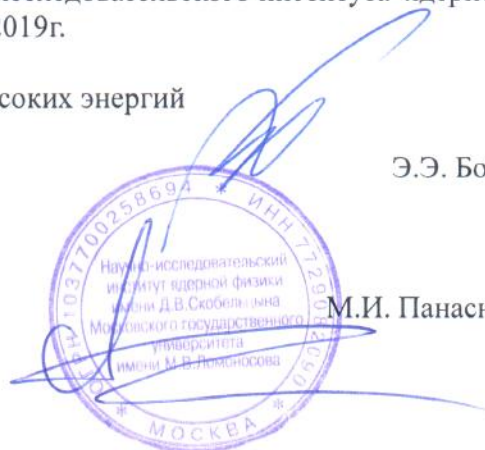
Л.К. Гладилин

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены была на семинаре Отдела экспериментальной физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ 16 сентября 2019г.

Заведующий Отдела экспериментальной физики высоких энергий  
НИИЯФ МГУ  
доктор физ-мат. наук, профессор

Э.Э. Боос

Директор НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
профессор



М.И. Панасюк



Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ),  
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2, Тел.:(495)9391818,  
Факс: (495)9390896, Эл. адрес: [info@sinp.msu.ru](mailto:info@sinp.msu.ru) <http://www.sinp.msu.ru/ru>

Публикации сотрудников НИИЯФ МГУ за последние 5 лет по теме диссертации:

1. FCC Collaboration; A. Abada et al., “FCC Physics Opportunities”, Eur. Phys. J. C 79 (2019) 474.
2. ZEUS Collaboration; H. Abramowicz et al. “Limits on contact interactions and leptoquarks at HERA”, Phys. Rev. D 99 (2019) 092006.
3. ATLAS Collaboration; A. Aaboud et al., “A strategy for a general search for new phenomena using data-derived signal regions and its application within the ATLAS experiment”, Eur. Phys. J. C 79 (2019) 120.
4. ATLAS Collaboration, M. Aaboud et al., “Search for scalar resonances decaying into  $\mu^+\mu^-$  in events with and without b-tagged jets produced in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP 07 (2019) 117.
5. ATLAS Collaboration, G. Aad et al., “Searches for scalar leptoquarks and differential cross-section measurements in dilepton–dijet events in proton–proton collisions at a centre-of-mass energy of  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS experiment”, Eur. Phys. J. C 79 (2019) 733.
6. CMS Collaboration, A.M. Sirunyan et al., “Search for excited leptons in  $\ell\ell\gamma$  final states in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV”, JHEP 04 (2019) 015.
7. CMS Collaboration, A.M. Sirunyan et al., “Search for vectorlike leptons in multilepton final states in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV”, Phys. Rev. D 100 (2019) 052003.
8. CMS Collaboration, A.M. Sirunyan et al., “A search for pair production of new light bosons decaying into muons in proton-proton collisions at 13 TeV”, Phys. Lett. B 796 (2019) 131.
9. CDF and D0 Collaborations, T. Aaltonen et al., “Tevatron Run II combination of the effective leptonic electroweak mixing angle”, Phys. Rev. D 97 (2018) 112007.
10. D0 Collaboration, V.M. Abazov et al., “Measurement of the Effective Weak Mixing Angle in  $p\bar{p} \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \ell+\ell^-$  Events”, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 241802.
11. ATLAS Collaboration, M. Aaboud et al., “Search for new phenomena in events with same-charge leptons and b-jets in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP 12 (2018) 039.
12. ATLAS Collaboration, M. Aaboud et al., “Search for new phenomena using the invariant mass distribution of same-flavour opposite-sign dilepton pairs in events with missing transverse momentum in  $\sqrt{s}=13$  TeV pp collisions with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 625.
13. ATLAS Collaboration, M. Aaboud et al., “Measurement of inclusive and differential cross sections in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP 10 (2018) 132.
14. ATLAS Collaboration, M. Aaboud et al., “Measurement of the Drell-Yan triple-differential cross section in pp collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV”, JHEP 12 (2017) 059.
15. ATLAS Collaboration, G. Aad et al., “Measurement of the double-differential high-mass Drell-Yan cross section in pp collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV with the ATLAS detector”, JHEP 08 (2016) 009.