УТВЕРЖДАЮ
Директор Лаборатории физики высоких энергий
им. В. И. Векслера и А. М. Балдина
_____В. Д. Кекелидзе
«26» 02 2019 года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-технического совета
Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований

Диссертация «**Исследование процессов парного рождения мюонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере**» выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина.

В течение длительного времени, с начала 2005 г. и включая период подготовки диссертации, соискатель **Шматов Сергей Владимирович** работает в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина в должности начальника сектора Научно-экспериментального отдела физики на CMS.

В 1995 г. С. В. Шматов окончил Московский инженерно-физический институт по специальности «экспериментальная ядерная физика», с момента окончания института по настоящее время работает в Объединенном институте ядерных исследований, последовательно занимая должности младшего научного сотрудника, научного сотрудника и начальника сектора. Решением диссертационного совета Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований от 14 ноября 2002 г. **№02–03** Шматову Сергею Владимировичу была присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа С. В. Шматова посвящена проверке предсказаний стандартной модели взаимодействий элементарных частиц (СМ) и поиску сигналов за рамками СМ в процессах рождения пары мюонов, а также исследованию множественного образования

частиц в эксперименте CMS при энергиях LHC. Работа проводилась в соответствии с проблемно-тематическим планом научно-исследовательских работ Лаборатории физики высоких энергий 02-0-1083-2009/2019.

Актуальность и научная значимость задачи.

Проверка предсказаний СМ, поиск и систематические исследования сигналов новой физики, наряду с исследованием свойств бозона Хиггса, являются основными задачами экспериментов в физике высоких энергий, в частности, проводимых на ускорительном комплексе Большой адронный коллайдер (LHC) в ЦЕРН.

Одним из наиболее перспективных способов регистрации сигналов новой физики за рамками СМ является измерение характеристик процесса рождения пары мюонов высоких энергий с противоположными знаками зарядов (димюоны). Этот процесс является наиболее чистым наблюдаемым каналом, с точки зрения фоновых условий, и, кроме того, установка CMS специально оптимизирована для измерения мюонов. Детектирующая аппаратура CMS позволяет регистрировать мюоны, обладающие энергией порядка ТэВ, с точностью порядка нескольких процентов и эффективностью, близкой к 100%.

Основным механизмом рождения пар мюонов в коллайдерных экспериментах является процесс Дрелла-Яна, измерение характеристик которого представляет собой один из критических тестов СМ в новой области энергий. Предыдущие эксперименты позволили провести изучение этого процесса в области переданных четырехимпульсов порядка несколько сотен ГэВ. Современные данные экспериментов на Большом адронном коллайдере, ATLAS и CMS, позволяют существенно расширить эту область и впервые выйти за границу ТэВ-ного масштаба взаимодействий.

Необходимость выхода за рамки СМ и существование различных сценариев новой физики обусловлены рядом открытых вопросов к СМ, как к теории, а также наличием в ней достаточно большого числа свободных параметров. В частности, для объединения трех разных взаимодействий, входящих в СМ – сильного, слабого и электромагнитного – были разработаны различные варианты Теории Великого Объединения (ТВО), основанные на более широких, по сравнению с СМ, калибровочных группах. В результате цепочек последовательного нарушения симметрии эти более широкие группы дают группу СМ. При этом на каждом этапе возникают новые калибровочные бозоны (бозоны расширенного калибровочного сектора, РКС), в литературе обозначаемые как Z' и W', массы которых задаются новыми промежуточными масштабами. Бозоны РКС могут

наблюдаться по их распадам на частицы СМ, в частности, на пару лептонов. Поиск таких объектов на LHC поможет ответить на вопрос, существуют ли в действительности механизмы, описанные выше, приводящие к объединению взаимодействий. Другие классы теоретических конструкций призваны решить проблему иерархии масштабов в СМ. Среди них – модели с дополнительными пространственными измерениями (ДПИ), иначе называемые моделями низкоэнергетической гравитации. Один из классов подобных сценариев новой физики предсказывает тяжелые КК–моды гравитона, которые могут проявлять себя как новые тяжелые частицы и, по аналогии с новым нейтральным калибровочным бозоном Z', могут быть обнаружены по распадам, в том числе, на пару лептонов (сигнал резонансного типа). В другом классе моделей с ДПИ КК-моды не разделяются в эксперименте как индивидуальные резонансы, а формируют плавную огибающую – нерезонансное превышение над фоном СМ (сигнал нерезонансного типа). За счет понижения фундаментального масштаба гравитации в многомерных теориях (имеет предположительное значение порядка одного или нескольких ТэВ, которое, в принципе, может быть достигнуто на LHC) оба типа сигналов могут наблюдаться уже при доступных в настоящее время энергиях. Их поиск в канале с парой лептонов в конечном состоянии входит в качестве одной из приоритетных задач в программу исследований эксперимента “Компактный мюонный соленоид” (CMS).

Другим интересным следствием многомерных теорий является возможность рождения микроскопических многомерных черных дыр (МЧД) на ускорителях. Характерной экспериментальной наблюдаемой для процессов с рождением и распадом МЧД является множественное рождение адронных струй (а также лептонов всех типов и других частиц), практически изотропно распределенных в пространстве. Подобные яркие необычные сигналы не имеют аналогов в рамках СМ и не должны быть пропущены в эксперименте при достижении на ускорителе энергии порядка фундаментального масштаба в моделях низкоэнергетической гравитации.

Новизна и практическая ценность работы:

Основные результаты диссертации, выносимые на защиту, являются важными для дальнейшего развития физики элементарных частиц. В результате исследований сигналов парного рождения мюонов и множественного рождения жестких частиц в столкновениях пучков LHC СМ была подтверждена на ранее неисследованном энергетическом масштабе взаимодействии элементарных частиц, и были получены принципиально новые ограничения в пространстве модельных параметров сценариев с расширенным калибровочным сектором и моделей многомерной гравитации. Все экспериментальные

данные, представленные в диссертации, получены впервые и представляют интерес для развития теоретических методов описания взаимодействия элементарных частиц.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что данная работа формулирует программу научных исследований эксперимента CMS в канале с парой мюонов в конечном состоянии. Предложенная программа исследований легла в основу соответствующих глав основополагающих документов коллаборации CMS: "CMS Physics Technical Design Report Vol. I: Detector performance and software" и "CMS Physics Technical Design Report Vol. II: Physics Performance", определяющих стратегию и методы научных исследований коллаборации. Предложенные и изученные в работе методы отбора и реконструкции мюонов с большими поперечными импульсами и мюонных пар с инвариантными массами до нескольких ТэВ, методы оценки величин систематических погрешностей сечений сигнальных и фоновых процессов были использованы в эксперименте CMS для реализации других направлений физической программы коллаборации в течение первого этапа работы LHC: открытия бозона Хиггса в канале с четырьмя лептонами, наблюдения редких распадов $B^0_S \rightarrow \mu+\mu-$, измерения функций распределения плотностей партонов (PDF) и др. Начиная с 2015 г., на основании этих разработок осуществляются исследования второго цикла работы LHC (RUN2) при номинальных значениях энергии и светимости, и, кроме того, проводится разработка новых направлений исследований как при повышенной светимости LHC (High Luminosity LHC), так и в других экспериментах физики высоких энергий на планируемых ускорительных комплексах.

Научно-технический совет ЛФВЭ ОИЯИ отмечает следующие, наиболее важные, результаты диссертационной работы, в получение которых С.В. Шматов внес определяющий вклад:

1. Разработка программы физических исследований эксперимента CMS по проверке стандартной модели и поиску новой физики в канале с парой мюонов в конечном состоянии, образующихся в столкновениях пучков протонов при энергии 14 ТэВ в с.ц.м.
2. Автору принадлежит разработка и реализация методов отбора пар мюонов с инвариантными массами до нескольких ТэВ и подавления фоновых процессов. Он активно участвовал в обработке и анализе данных тестов детекторных систем установки CMS на пучках SPS в ЦЕРН, а также данных глобального сеанса на космических мюонах при включенном магнитном поле, проведенного для

широкомасштабного теста программного обеспечения CMS перед началом работы LHC.

3. Автору принадлежит ряд важных физических результатов, связанных с разработкой и реализацией методов экспериментального измерения сечения процесса Дрелла-Яна и пространственной асимметрии вылета мюона в области инвариантных масс до нескольких ТэВ, полученных им в период формирования исследовательской программы эксперимента CMS до старта LHC и, впоследствии, при проведении непосредственных измерений этого процесса в течение первого этапа работы ускорителя (2010–2012 гг.). Являясь ответственным за разработку программы по изучению процесса Дрелла-Яна и поиску новой физики в канале с парой мюонов, автор предложил и активно участвовал в реализации методов коррекции и учета систематических эффектов, в выборе и оптимизации способов оценки экспериментальных систематических погрешностей. Непосредственно им были рассчитаны теоретические погрешности вычислений сечения процесса Дрелла–Яна, связанные с неточным знанием функций распределения кварков и глюонов, неопределенностью энергетической шкалы КХД, конечной точностью определения бегущей константы связи КХД.
4. В русле поиска сигналов новой физики за рамками СМ в канале с парой мюонов методами физического моделирования автором впервые была показана возможность наблюдения, с учетом систематических эффектов, сигналов от многомерной гравитации в сценариях с большими дополнительными пространственными измерениями и сигналов от дополнительных калибровочных бозонов Z' в моделях с расширенным калибровочным сектором. Автор предложил и активно участвовал в реализации методов поиска сигналов резонансного и нерезонансного типов по их вкладу в процесс Дрелла–Яна. При его непосредственном участии были получены оценки на границы значений модельных параметров, которые могут быть наблюдены на LHC.
5. Во время первого цикла работы LHC (RUN1) в 2010–2012 гг. при энергии столкновений протонов 7 и 8 ТэВ в с.ц.м с активным участием и определяющим вкладом диссертанта в реализацию и развитие исследовательской программы в канале с парой мюоннов в конечном состоянии был получен ряд важных результатов. В частности, впервые были измерены в новых кинематических областях дифференциальное сечение и дважды дифференциальное сечение процесса Дрелла-Яна, пространственная асимметрия вылета лептонов при энергии взаимодействия протонов 7 и 8 ТэВ. Также были измерены энергетическая

зависимость сечений и инклюзивные сечения рождения Z^0-бозона при энергии 7 и 8 ТэВ. Впервые в канале с парой мюонов было измерено значение эффективного угла Вайнберга.

6. В русле поиска возможных сигналов новой физики были установлены верхние пределы на сечение рождения нейтральных калибровочных бозонов РКС и сечение рождения калуца–клейновских возбужденных состояний многомерного гравитона с распадом на пару лептонов. Были получены принципиально новые экспериментальные ограничения на массы резонансных состояний со спином 1 и 2. Для сигналов нерезонансного типа впервые были установлены верхние пределы на сечение процесса рождения пар мюонов с виртуальным обменом гравитонами и получены принципиально новые экспериментальные ограничения на фундаментальный масштаб многомерной гравитации, в зависимости от числа дополнительных измерений.
7. В канале множественного рождения частиц модельно-независимым способом впервые были получены верхние пределы на сечения процессов множественного рождения частиц в области значений полной поперечной энергии от 1.5-5.0 ТэВ для классов событий с множественностью $N \geq 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ частиц в конечном состоянии. Впервые в коллайдерных экспериментах были установлены ограничения сверху на сечения процессов образования квазиклассических и квантовых микроскопических черных дыр, а также струнных шаров в различных модельных предположениях. Впервые были получены ограничения на пространство параметров (массы объектов, фундаментальный масштаб и число дополнительных измерений) для МЧД в моделях низкоэнергетической гравитации.

Достоверность представленных в диссертации результатов определяется непосредственным сравнением и согласованностью выполненных предсказаний с экспериментальными данными, полученными на LHC автором в составе коллаборации CMS, а также сравнением с результатами второго многоцелевого эксперимента на LHC - ATLAS. Критерием достоверности служит также включение основных результатов по ограничению модельных параметров проанализированных сценариев новой физики в регулярные обзоры по физике частиц Particle Data Group за 2012 - 2018 гг.

Результаты, полученные в диссертационной работе, неоднократно представлялись автором и обсуждались на научных семинарах Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), а также на семинарах других профильных научных институтов, в том числе – в НИИЯФ МГУ, ПИЯФ, ИТЭФ, докладывались автором на рабочих

совещаниях коллаборации CMS в ЦЕРН, ОИЯИ, ИТЭФ, МГУ; на ежегодных конференциях коллаборации RDMS CMS, на международных рабочих совещаниях, научных школах, конференциях и симпозиумах (всего более 80 выступлений, сделанных лично автором).

По материалам диссертации автором и в коллективе соавторов опубликованы работы в русскоязычных и иностранных изданиях, рекомендованных ВАК для докторских диссертаций, в том числе – в журналах Ядерная физика, ЭЧАЯ, Письма в ЭЧАЯ, Physics Letters B, Physical Review D, JHEP и в ряде других. Полный список включает 53 работы, 32 из которых опубликованы в рецензируемых журналах:

1. I. Golutvin, P. Moissenz, V. Palichik, M. Savina, S. Shmatov, "Search for TeV-scale bosons in the dimuon channel at the LHC", Czech. J. Phys. **54**, A261 (2004).
2. G. Bayatian, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "CMS Physics Technical Design Report, Volume II: Physics Performance"', J. Phys. G: Nucl. Part. **34**, 995 (2006), pp. 1248-1252, 1448-1454.
3. I. I. Belotelov, ..., S. V. Shmatov et al., "Electromagnetic Secondaries and Punch-Through Effects in the CMS ME1/1"', Письма в ЭЧАЯ **4**, 583-586 (2007).
4. И. А. Голутвин, В. В. Пальчик, М. В. Савина, С. В. Шматов, "Поиск новых нейтральных калибровочных бозонов на LHC", ЯФ **70**, 61 (2007).
5. A. Lanyov and S. Shmatov, "Studies of Drell-Yan dimuon events in the CMS experiment"', Nucl. Phys. Proc. Suppl. 177-178, **302** (2008).
6. S. Shmatov, "Search for extra dimensions with the CMS detector"', Nucl. Phys. Proc. Suppl. **177-178**, 330 (2008).
7. S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Performance of CMS Muon Reconstruction in Cosmic-Ray Events"', JINST **5**, T03022 (2010).
8. С. В. Шматов, С. Г. Шульга, "Теоретические неопределенности в сечениях инклюзивного рождения струи в экспериментах LHC при энергии 14 ТэВ", ПФМТ **4**, 18 (2010).
9. С. В. Шматов, "Поиск дополнительных измерений в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере", ЯФ **74**, 511 (2011).
10. S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Measurement of the weak mixing angle with the Drell-Yan process in proton-proton collisions at the LHC", Phys. Rev. D **84**, 112002 (2011).
11. S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Search for Resonances in the Dilepton Mass Distribution in pp Collisions at 7 TeV", JHEP **05**, 093 (2011).

12. V. Khachatryan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Search for Microscopic Black Hole Signatures at the Large Hadron Collider", Phys. Lett. B. **697**, 434 (2011).

13. S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Search for narrow resonances in dilepton mass spectra in pp collisions at 7 TeV", Phys. Lett. B **714**, 158 (2012).

14. S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Search for microscopic black holes in pp collisions at 7 TeV", JHEP **04**, 061 (2012).

15. S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Measurement of the differential and double differential Drell-Yan cross sections in proton-proton collisions at 7 TeV", JHEP **12**, 030 (2013).

16. S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Forward-backward asymmetry of Drell-Yan lepton pairs in pp collisions at 7 TeV", Phys. Lett. B **718**, 752 (2013).

17. И. Н. Горбунов, С. В. Шматов, "Измерение асимметрии "вперед-назад" и слабого угла смешивания в процессах рождения пар лептонов в pp-столкновениях при 7 ТэВ в эксперименте CMS на LHC", ЯФ **76**, 1160 (2013).

18. S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Search for heavy narrow dilepton resonances in pp collisions at 7 TeV and 8 TeV", Phys. Lett. B **720**, 63 (2013).

19. С. В. Шматов, "Поиск физики за рамками стандартной модели во взаимодействиях протонов при 7 ТэВ в эксперименте CMS на LHC", ЯФ **76**, 1166 (2013).

20. S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Search for microscopic black holes in pp collisions at 8 TeV", JHEP **07**, 178 (2013).

21. В. Ф. Коноплянников, М. В. Савина, С. В. Шматов, С. Г. Шульга, "Неопределенности сечения рождения пар мюонов в процессе Дрелла-Яна при столкновении протонов на LHC", Письма в ЭЧАЯ **11**, 1122 (2014).

22. I. N. Gorbunov and S. V. Shmatov, "Measurement of the Forward-Backward Asymmetry of $\mu+\mu-$ Pairs in CMS", ЭЧАЯ **45**, 211 (2014).

23. V. Khachatryan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Measurements of differential and double-differential Drell-Yan cross sections in proton-proton collisions at 8 TeV", Eur. Phys. J. C **75**, 147 (2015).

24. И. Н. Горбунов, С. В. Шматов, "Изучение процессов Дрелла-Яна в эксперименте CMS", ЯФ **78**, 647 (2015).

25. V. Khachatryan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Search for physics beyond the standard model in dilepton mass spectra in proton-proton collisions at 8 TeV"', JHEP **1504**, 025 (2015).

26. С. В. Шматов, "Обзор результатов эксперимента CMS", ЯФ 78, 546 (2015).

27. М. Г. Гавриленко, В. Ф. Конопляников, М. В. Савина, С. Г. Шульга, С. В. Шматов, "Сечения процесса Дрелла-Яна в столкновении протонов на LHC", ЯФ **79**, 50 (2016).

28. V. Khachatryan, ..., S. Shmatov et al. (CMS Collab.), "Forward-backward asymmetry of Drell-Yan lepton pairs in pp collisions at 8 TeV", Eur. Phys. J. C **76**, 325 (2016).

29. С. В. Шматов, "Обзор результатов эксперимента CMS на LHC по поиску дополнительных пространственных измерений", ЯФ **79**, 157 (2016).

30. С. В. Шматов, "Изучение физики стандартной модели в эксперименте CMS", ЭЧАЯ **48**, 701 (2017).

31. И. А. Голутвин, С. В. Шматов, "Эксперимент CMS: результаты и перспективы", ЭЧАЯ **48**, 604 (2017).

32. С. В. Шматов, "Некоторые результаты эксперимента CMS на LHC по поиску физики за рамками Стандартной модели", ЭЧАЯ **49**, 1291-1301 (2018).

НТС считает, что диссертационная работа С. В. Шматова представляет собой законченное научное исследование – от разработки методов и установки предсказаний с помощью физического моделирования до проведения непосредственных измерений и получения экспериментальных результатов и ограничений, – выполненное на высоком научном уровне и содержащее новые результаты, все из которых были получены впервые. Проведенные автором исследования процесса парного рождения мюонов на ускорителе LHC в абсолютно новой области энергий столкновений протонов, проверка стандартной модели взаимодействий элементарных частиц и поиск новой физики за ее рамками в канале с парой мюонов, в также в канале множественного рождения частиц, могут быть квалифицированы как значительный вклад в развитие физики элементарных частиц. Выполненная на основании этих исследований диссертационная работа соответствует специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Диссертация Шматова Сергея Владимировича «Исследование процессов парного рождения мюонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц».

Заключение принято на заседании Научно-технического совета Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований. Присутствовало на заседании 28 членов НТС ЛФВЭ из полного состава численностью 40 человек. Результаты голосования: «за» - 28 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол №1 от 05.02.2019 г.

Заключение составил
доктор физ.- мат. наук — Б.В. Батюня

Председатель НТС ЛФВЭ
доктор физ.- мат. наук — Е. А. Строковский

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ
кандидат физ.- мат. наук — С. П. Мерц