

## ЗАЯВКА

на участие в конкурсе на соискание премий ОИЯИ 2021 г.

### Творческий коллектив:

1. Шматов Сергей Владимирович (1,0) – руководитель, начальник сектора, сектор №1, НЭОФСМС ЛФВЭ, Shmatov Sergei Vladimirovich
2. Голутвин Игорь Анатольевич (1,0) – гнс, НЭОФСМС ЛФВЭ, Golutvin Igor Anatolievich
3. Зарубин Анатолий Вадимович (1,0) – внс, НЭОФСМС ЛФВЭ, Zarubin Anatoli Vadimovich
4. Зыкунов Владимир Александрович (1,0) – внс, сектор №1, НЭОФСМС ЛФВЭ, Zykunov Vladimir Alexandrovich
5. Каржавин Владимир Юрьевич (1,0) – начальник отдела, НЭОФСМС ЛФВЭ, Karjavin Vladimir Yurievich
6. Кореньков Владимир Васильевич (1,0) – директор лаборатории, ЛИТ, Korenkov Vladimir Vasilievich
7. Ланёв Александр Викторович (1,0) – внс, сектор №1, НЭОФСМС ЛФВЭ, Lanyov Alexander Viktorovich
8. Матвеев Виктор Анатольевич (1,0) – научный руководитель Института, Matveev Viktor Anatolievich
9. Пальчик Владимир Владимирович (1,0) – внс, сектор №2, НТОПИО, ЛИТ, Palchik Vladimir Vladimirovich
10. Савина Мария Вячеславовна (1,0) – внс, сектор №1, НЭОФСМС ЛФВЭ, Savina Maria Vyacheslavovna

### Название цикла работ

“Экспериментальная проверка предсказаний Стандартной модели взаимодействий и поиск сигналов новой физики в процессах образования пар мюонов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере”

по теме “CMS. Компактный мюонный соленоид на LHC, 02-0-1083-2009/2022”.

### Аннотация работы

Настоящая работа основана на результатах исследований, выполненных в 2002–2021 гг. в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) и Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН, Женева). В представляемом цикле работ представлены результаты подготовки и реализации программы физических исследований в канале с парой мюонов на многоцелевом детекторном комплексе “Компактный мюонный соленоид” (Compact Muon Solenoid, CMS), на Большом адронном коллайдере (LHC).

Систематическое изучение процессов с образованием мюонами высоких энергий в эксперименте CMS было инициировано физиками ОИЯИ в 2002 году. Предложенный подход для исследования физических процессов с мюонами больших поперечных импульсов  $p_T$  в конечном состоянии охватывает весь спектр возможных проблем, возникающих при решении подобных задач — от теоретических вычислений до комплексного анализа экспериментальных данных.

Впервые процессы рождения пар мюонов с большими инвариантными массами в столкновениях адронов наблюдались в конце 60-х годов в экспериментах на синхротроне AGS (Брукхейвенская национальная лаборатория, США), нацеленных на поиск переносчиков слабого взаимодействия. Теоретическое описание этого процесса было предложено независимо С. Дреллом и Т.-М. Яном и В. А. Матвеевым, Р. М. Мурадяном, А. Н. Тавхелидзе. Этот процесс имеет исключительную важность для физики адронных коллайдеров, поскольку измерение его характеристик представляет собой критический тест Стандартной модели (СМ), в том числе в новой области энергий. Современные данные экспериментов на LHC позволяют исследовать рождение лептонных пар в области инвариантных масс до нескольких ТэВ/с, т. е. впервые выйти за границу ТэВ-ного масштаба взаимодействий. Кроме задач, связанных с проверкой предсказаний СМ, этот процесс уже несколько десятков лет используется в качестве важнейшего инструмента для поиска сигналов новой физики.

На протяжении почти 20 лет физики ОИЯИ вносили определяющий вклад в подготовку, реализацию и развитие предложенной программы физических исследований.

В 2002–2009 гг. впервые систематически показана возможность измерений характеристик процесса рождения пар мюонов в области их инвариантных порядка 1–5 ТэВ/с<sup>2</sup> и разработана методика поиска сигналов новой физики нерезонансного и резонансного типов для состояний со спином 1 и 2. На примере моделей расширенного калибровочного сектора и сценариев многомерной гравитации с пониженным масштабом взаимодействия впервые продемонстрирована возможность наблюдения подобных сигналов в канале с парой  $\mu^+\mu^-$  в конечном состоянии при энергии взаимодействия протонов в с.ц.м.  $\sqrt{s} = 14$  ТэВ. В терминах модельных параметров этих сценариев определен потенциал открытия эксперимента CMS. Выполненные исследования сформулировали программу научных исследований эксперимента CMS в канале с парой мюонов в конечном состоянии. Предложенная программа исследований легла в основу соответствующих глав проектов коллаборации CMS “CMS Physics Technical Design Report”, определяющих стратегию и методы научных исследований коллаборации.

В 2010-2021 гг. коллаборацией CMS с определяющим участием физиков из ОИЯИ были получены новые уникальные данные о взаимодействиях частиц СМ при рекордных энергиях, которые были достигнуты во время первого (RUN1) и второго (RUN2) этапов работы LHC. При  $\sqrt{s} = 7$  и 8 ТэВ измерены дифференциальные сечения процесса рождения лептонных пар в областях переменной Бьёркена  $3 \times 10^{-4} < x < 1.0$  и переданного 4-импульса  $3 \times 10^2 < Q^2 < 3 \times 10^6$  ГэВ<sup>2</sup>/с<sup>4</sup>, ранее недоступных для изучения. Дважды дифференциальные сечения измерены в области  $6 \times 10^2 < Q^2 < 7.5 \times 10^5$  ГэВ<sup>2</sup>/с<sup>4</sup>. С рекордной точностью измерены сечение рождения Z<sup>0</sup>-бозона  $\sigma_Z = 1138 \pm 8$  (эксп.)  $\pm 25$  (теор.)  $\pm 30$  (свет.) пбн. Сравнения результатов измерений с теоретическими вычислениями продемонстрировали справедливость СМ в новой области энергий. На полной статистике RUN1 и RUN2 при  $\sqrt{s} = 7, 8$  и 13 ТэВ выполнена серия экспериментов, нацеленных на обнаружение сигналов новой физики, предсказываемых теориями с расширенным калибровочным сектором, моделей многомерной гравитации, сценариев с кандидатами на роль частиц темной материи. Получены принципиально новые ограничения в пространстве модельных параметров проанализированных сценариев и проверена универсальность взаимодействий в лептонном секторе.

Полученные результаты неоднократно докладывались членами авторского коллектива на представительных международных конференциях и опубликованы в ведущих научных журналах. Основные результаты включены в регулярные обзоры по физике частиц Particle Data Group за 2012–2020 гг. По материалам исследований подготовлены и защищены 3 докторские, 2 кандидатские и 1 PhD диссертации.

Представленный цикл работ основан на экспериментальных результатах, полученных в период 2002–2021 гг. и опубликованных в следующих журнальных статьях и в виде глав монографий:

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. М. В. Савина, С. В. Шматов, “Физика дополнительных измерений на Большом адронном коллайдере”, *Экспериментальные методы в физике частиц*, Ответственный редактор – А. В. Зарубин, Дубна: ОИЯИ, 2004. 374 с., 5-9530-0095-2.
3. G. Bayatian 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.
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. B. Proc. Suppl.* 177–178, **302** (2008).
6. S. Shmatov, “Search for extra dimensions with the CMS detector”, *Nucl. Phys. B. Proc. Suppl.* 177–178, **330** (2008).
7. М. В. Савина, С. В. Шматов, “Физика с дополнительными пространственными измерениями”, В глубь материи: Физика XXI века глазами создателей экспериментального комплекса на Большом адронном коллайдере в Женеве, М. Этерна, 2009, - 576 с., ISBN 978-5-480-00211-9.
8. S. Chatrchyan et al. (CMS Collab.), “Search for Resonances in the Dilepton Mass Distribution in pp Collisions at 7 TeV”, *ЖНЕР* **05**, 093 (2011).
9. С.В. Шматов, “Поиск дополнительных измерений в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере”, *ЯФ* **74**, 511 (2011).
10. S. Chatrchyan et al. (CMS Collab.), “Search for narrow resonances in dilepton mass spectra in pp collisions at 7 TeV”, *Phys. Lett.* **B 714**, 158 (2012).
11. S. Chatrchyan (CMS Collab.), “Search for heavy narrow dilepton resonances in pp collisions at 7 TeV and 8 TeV”, *Phys. Lett.* **B 720**, 63 (2013).
12. S. Chatrchyan et al. (CMS Collab.), “Measurement of the differential and double differential Drell–Yan cross sections in proton–proton collisions at 7 TeV”, *ЖНЕР* **12**, 030 (2013).
13. С.В. Шматов, “Поиск физики за рамками стандартной модели во взаимодействиях протонов при 7 ТэВ в эксперименте CMS на LHC”, *ЯФ* **76**, 1166 (2013).
14. В. Ф. Конопляников, 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).
15. А.В. Ланёв, "Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики", *УФН* **184** №9 (2014) 996-1004.
16. V. Khachatryan 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).
17. V. Khachatryan et al. (CMS Collab.), “Search for physics beyond the standard model in dilepton mass spectra in proton–proton collisions at 8 TeV”, *ЖНЕР* **1504**, 025 (2015).
18. А.В. Ланёв, "Последние результаты коллаборации CMS по поискам физики вне стандартной модели", *ЯФ* **78** №6 (2015) 558-562.

19. С.В. Шматов, “Обзор результатов эксперимента CMS”, ЯФ **78**, 546 (2015).
20. 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).
21. С. В. Шматов, “Обзор результатов эксперимента CMS на LHC по поиску дополнительных пространственных измерений”, ЯФ **79**, 157 (2016).
22. С. В. Шматов, “Обзор результатов эксперимента CMS”, Физика на LHC: Труды объединенного семинара RDMS CMS. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — Вып. 4 — 13–119, ISBN 978-5-9530-0437-4.
23. CMS Collaboration, “Search for narrow resonances in dilepton mass spectra in proton-proton collisions at 13 TeV and combination with 8 TeV data”, Phys. Lett. B **768** (2017) 57.
24. С.В. Шматов, “Изучение физики стандартной модели в эксперименте CMS”, ЭЧАЯ **48**, 701 (2017).
25. А.В. Ланёв, “Результаты коллаборации CMS по поиску тяжелых дилептонных и дифотонных резонансов”, ЭЧАЯ **48** № 5 (2017) 677-682.
26. И.А. Голутвин, С.В. Шматов, “Эксперимент CMS: результаты и перспективы”, ЭЧАЯ **48**, 604 (2017).
27. А.М. Sirunyan et al. (CMS Collab.), "Search for high-mass resonances in dilepton final states in proton-proton collisions at 13 TeV", JHEP **1806**, 120 (2018).
28. С.В. Шматов, “Некоторые результаты эксперимента CMS на LHC по поиску физики за рамками Стандартной модели”, ЭЧАЯ **49** №4, 1291–1301 (2018).
29. A. Lanyov, S. Shmatov, I. Zhizhin, "Search for new neutral gauge bosons with the CMS Experiment at the LHC", EPJ Web Conf. **177**, 04005 (2018).
30. А.М. Sirunyan et al. (CMS Collab.), "Search for contact interactions and large extra dimensions in the dilepton mass spectra from proton-proton collisions at 13 TeV", JHEP **04**, 114 (2019).
31. М.В. Савина, С.В. Шматов, "В поисках новой физики", в сб. Очерки по современной физике частиц. Под общ. ред. В.А. Матвеева, И.А. Голутвина – Дубна: ОИЯИ, 2020 - с. 133-215, ISBN 978-5-9530-0506-7.
32. А.В. Зарубин, А.В. Ланёв, М.В. Савина, С.В. Шматов, "Физика с тяжелыми димюонами", в сб. Очерки по современной физике частиц. Под общ. ред. В.А. Матвеева, И.А. Голутвина – Дубна: ОИЯИ, 2020 - с. 290-317, ISBN 978-5-9530-0506-7.
33. И.А. Голутвин, С.В. Шматов, "Планы и перспективы физики на LHC", в сб. Очерки по современной физике частиц. Под общ. ред. В.А. Матвеева, И.А. Голутвина – Дубна: ОИЯИ, 2020 - с. 99-111, ISBN 978-5-9530-0506-7.
34. А.М. Sirunyan et al. (CMS Collab.), "Search for resonant and nonresonant new phenomena in high-mass dilepton final states at 13 TeV ", JHEP **07**, 208 (2021).
35. И.А. Жижин, А.В. Ланёв, С.В. Шматов, "Поиск новой физики в дилептонном канале в эксперименте CMS на LHC", ЯФ **84** №1 (2021).

Представленные в цикле работы по выполнены под руководством и при определяющем участии членов авторского коллектива. Физики ОИЯИ являлись ответственными за проведение исследований, включая теоретические расчеты, моделирование, набор, обработку и анализ экспериментальных данных, а также подготовку публикаций и разделов проектов эксперимента CMS по физической программе. В соавторстве с физиками других институтов полученные результаты опубликованы во

внутриколлекторных препринтах с ограниченным числом авторов, на основании которых были опубликованы статьи CMS.

Членами авторского коллектива результаты докладывались на научных семинарах Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), Научно–исследовательского института ядерной физики МГУ им. Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова (ПИЯФ); Института ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), Института физики высоких энергий (ИФВЭ), Института теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова (ИТЭФ), институтов стран-участниц ОИЯИ и участниц коллаборации CMS, рабочих совещаниях коллаборации CMS; ежегодных конференциях коллаборации RDMS CMS, на международных рабочих совещаниях, научных школах, конференциях и симпозиумах (всего более 100 выступлений, в том числе от имени коллаборации CMS), среди которых Международная конференция по физике на LHC (Physics at LHC), Международные рабочие совещания по физике высоких энергий и квантовой теории поля (QFTHEP), Международные «рочестерские» конференции по физике высоких энергий (ICHEP), Симпозиум по физике на адронных коллайдерах (HCP), Международный симпозиум по спиновой физике (SPIN2012), Международные рабочие совещания “High Energy Spin Physics” (DSPIN), Балдинские международные семинары по проблемам физики высоких энергий “Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика”, Сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий».