

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Представляется цикл работ

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

Раздел: Научно-исследовательские экспериментальные работы

Коллектив соавторов:

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

В представленный цикл работ входят 34 публикации:

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., ISBN 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", JHEP **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", JHEP **12**, 030 (2013).
13. С.В. Шматов, "Поиск физики за рамками стандартной модели во взаимодействиях протонов при 7 ТэВ в эксперименте CMS на ЛHC", 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 ЛHC", 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", JHEP **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 ЛHC", ЯФ **79**, 50 (2016).
21. С. В. Шматов, "Обзор результатов эксперимента CMS на ЛHC по поиску дополнительных пространственных измерений", ЯФ **79**, 157 (2016).
22. С. В. Шматов, "Обзор результатов эксперимента CMS", Физика на ЛHC: Труды объединенного семинара RDMS CMS. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — Вып. 4 — 13–119, ISBN 978-5-9530-0437-4.
23. A. Lanyov, "CMS Results on Dimuon Physics", CMS CR-2016/278, CERN 2016, Presented at 19th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, 2016.
24. V. Khachatryan (CMS Collab.), "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.

25. С.В. Шматов, “Изучение физики стандартной модели в эксперименте CMS”, ЭЧАЯ **48**, 701 (2017).
26. А.В. Ланёв, “Результаты коллаборации CMS по поиску тяжелых дилептонных и дифотонных резонансов”, ЭЧАЯ **48** № 5 (2017) 677-682.
27. И.А. Голутвин, С.В. Шматов, “Эксперимент CMS: результаты и перспективы”, ЭЧАЯ **48**, 604 (2017).
28. A.M. 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).
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. A.M. 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. 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.
32. 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.
33. И.А. Жижин, А.В. Ланёв, С.В. Шматов, "Поиск новой физики в дилептонном канале в эксперименте CMS на LHC", ЯФ **84** №1 (2021).
34. A.M. 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).

Выдвигаемый на конкурс работ ОИЯИ цикл статей основан на результатах исследований, выполненных в 2002–2021 гг. в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) и Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН, Женева) в рамках темы “CMS. Компактный мюонный соленоид на LHC, 02-0-1083-2009/2022”. Результаты опубликованы в научных журналах, материалах конференций и в виде глав монографий.

Цикл работ посвящен подготовке, реализации и развитию программы физических исследований в канале с парой мюонов на многоцелевом детекторном комплексе “Компактный мюонный соленоид” (Compact Muon Solenoid, CMS) на Большом адронном коллайдере (LHC).

Цикл работ объединяет результаты разработки физической программы исследований эксперимента CMS в канале с парой высокоэнергетичных мюонов [1–7], проверки предсказаний Стандартной модели в этом канале, выполненных на данных первого этапа работы LHC (RUN1 LHC) при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ [12, 14, 16, 20, 25], и результаты поисковых экспериментов, нацеленных на обнаружение сигналов новой физики, проведенных на полной статистике первого и второго этапов (RUN1 и RUN2 LHC) работы LHC при $\sqrt{s} = 7$, 8 и 13ТэВ [8–11, 15, 17–19, 21–24, 26–34].

Систематическое изучение процессов рождения пар мюонов высоких энергий в эксперименте CMS было инициировано физиками ОИЯИ в 2002 году. Предложенный подход для исследований физических процессов с мюонами больших поперечных импульсов рт в конечном состоянии охватывает весь спектр возможных проблем, возникающих при решении подобных задач — от теоретических вычислений до комплексного анализа экспериментальных данных. Более узко данная проблематика была

сформулирована как исследование закономерностей парного рождения противоположно заряженных мюонов с большими инвариантными массами (тяжелых димюонов) для проверки предсказаний СМ в новой области энергий и поиска сигналов новой физики по возможным отклонениям от ее предсказаний. Это направление физической программы эксперимента CMS стало одним из приоритетных для специалистов RDMS (Russia and Dubna Member States — коллаборация институтов России и ОИЯИ в CMS) из ОИЯИ.

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. Впоследствии этот механизм, получивший широкую известность как механизм Дрелла–Яна, был детально изучен в различных экспериментах. 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/c², т. е. впервые выйти за границу ТэВ-ного масштаба взаимодействий. Кроме задач, связанных с проверкой предсказаний СМ, этот канал уже несколько десятков лет используется в качестве важнейшего инструмента для поиска сигналов новой физики.

Одним из приоритетных направлений исследований в современной физике элементарных частиц является поиск отклонений от предсказаний СМ. Подобные отклонения в канале с парой лептонов предсказываются довольно широким классом моделей новой физики и могут быть обусловлены, например, рождением новых нейтральных калибровочных бозонов Z' в теориях великого объединения (ТВО), рождением калуца-клейновских (КК) состояний гравитона в сценариях многомерной гравитации с пониженным масштабом взаимодействия или кандидатов в частицы темной материи (ТМ). Кроме того, данный канал чувствителен к существованию новых легких хиггсовских состояний, предсказываемых в теориях с неминимальным хиггсовским сектором, содержащим два дублета и один синглет хиггсовских полей – 2HDM+S (в частности, хиггсовский сектор неминимальной суперсимметричной модели NMSSM дает один из вариантов 2HDM+S); подобные легкие скалярные состояния присутствуют также в других теоретических конструкциях с расширенным составом хиггсовских полей.

Упомянутые выше новые теории могут модифицировать распределение масс дилептонов двумя способами. Во-первых, в присутствии новых частиц, распадающихся непосредственно на два лептона, мы ожидаем увидеть узкий пик в распределении по инвариантной массе, называемый резонансом. Во-вторых, ряд теоретических моделей, вместо этого, предсказывает нерезонансное усиление выхода мюонных пар в широкой области масс (или, наоборот, – недостаток) относительно фоновых предсказаний СМ.

Подобные исследования в дилептонном канале имеют длинную историю открытия новых частиц. Таким образом были обнаружены, например, J/ψ -мезон, открытый в 1974 г. на ускорительных комплексах SLAC и BNL, Y -мезон, открытый в 1977 г. в Fermilab, и Z -бозон, открытый в 1983 г. в CERN. Теперь рождение этих частиц, десятилетия назад считавшихся редкими, в больших количествах происходит на LHC. Это наглядно продемонстрировано на рисунке 1 (левый), где показан наблюдаемый CMS спектр масс пар мюонов с пиками, соответствующими резонансно распадающимся частицам. В наших исследованиях мы продвигаемся далеко в неизведанную область больших инвариантных масс дилептонов, в надежде снова открыть что-то новое.

Большой адронный коллайдер (LHC), спроектированный как «машина открытий», предоставляет уникальные возможности по поиску сигналов новой физики. В наших исследованиях мы опираемся на способность CMS аккуратно и с высокой эффективностью регистрировать и реконструировать электроны и мюоны с энергиями и импульсами более высокими, чем когда-либо прежде в коллайдерных экспериментах (рис. 1, правый). Такие условия ставят перед нами множество сложных разнообразных задач на всех этапах, от калибровки детекторных систем и разработки алгоритмов реконструкции и идентификации до мониторинга работы всех компонент физического анализа.

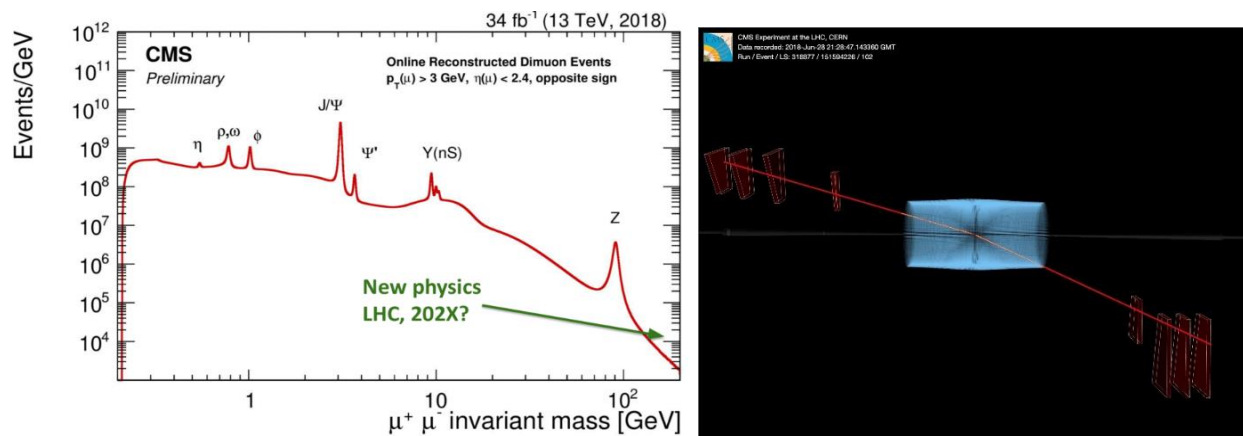


Рис.1. Левый – спектр инвариантных масс димюонов с характерными пиками в распределении, соответствующими открытым в ускорительных экспериментах частицам. Правый – визуализация события с наибольшей массой из числа зарегистрированных CMS мюонных пар со значением инвариантной массы 3.34 ТэВ/c².

Основные результаты, полученные в рамках представленного цикла работ:

1. Разработка программы физических исследований эксперимента CMS в канале с парой мюонов

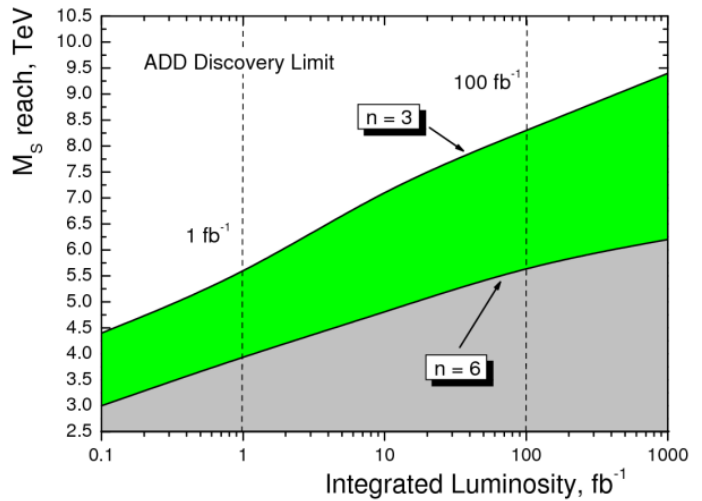
Предложена, обоснована и детально разработана программа физических исследований эксперимента CMS по проверке Стандартной модели и поиску новой физики в канале с парой мюонов в конечном состоянии, образующихся в столкновениях пучков протонов при энергии при $\sqrt{s} = 14$ ТэВ [1-7].

На данных Монте–Карло впервые продемонстрирована возможность экспериментального измерения сечения процесса Дрелла–Яна в области инвариантных масс до нескольких ТэВ/c², которые были недоступны для измерения до LHC. Разработаны методики измерения сечения процесса Дрелла–Яна, коррекции систематических эффектов, способы оценки экспериментальных систематических погрешностей [3]. 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 [3, 14, 20].

С учетом влияния систематических эффектов, связанных с регистрирующей аппаратурой, методами отбора и реконструкции мюонов и точностью теоретических вычислений впервые показана возможность наблюдения сигналов от многомерной гравитации, предсказываемых сценарием с большими дополнительными измерениями, предложенном в 1998 г. Н. Аркани-Хамедом, С. Димопулосом и Г. Двали (модель ADD). Разработана методика поиска сигналов новой физики нерезонансного типа в канале с парой мюонов в конечном состоянии. Вычислен ожидаемый предел наблюдения нерезонансного сигнала в

рамках сценария ADD (рис. 2) в зависимости от модельных параметров – величины струнного масштаба M_S и числа дополнительных измерений n [2, 3].

Рис. 2. Ожидаемый предел, соответствующий статистической значимости 5σ , для величины струнного масштаба M_S в модели ADD (параметризация HLZ) для числа дополнительных измерений $n=3-6$ [3].



Также впервые показана возможность наблюдения тяжелых резонансных состояний со спином 1 и спином 2. В

качестве референсного сценария резонанса со спином 2 рассмотрена модель многомерной гравитации, основанной на гипотезе «стянутых» дополнительных пространственных измерений с метрикой многомерного пространства анти-де Ситтера AdS_5 (модель Рэндалл-Сандрума, тип 1 — RS1) [1–3]. Тяжелые резонансные состояния со спином 1 анализировались [2–4] на примере предсказаний расширенных калибровочных моделей, основанных на группах ТВО E_6 и $SO(10)$. В ходе исследований разработана методика поиска сигналов новых резонансных состояний со спином 2 и спином 1 в канале с парой мюонов в конечном состоянии. Ожидаемые экспериментальные ограничения в пространстве модельных параметров RS1 сценария (кривизна пространства k и многомерный планковский масштаб M_{5D}) приведены на рисунке 3, левый. Верхний предел на массу Z' бозона, соответствующий статистической значимости более 5σ для разных значений интегральной светимости, представлен на рисунке 3, правый.

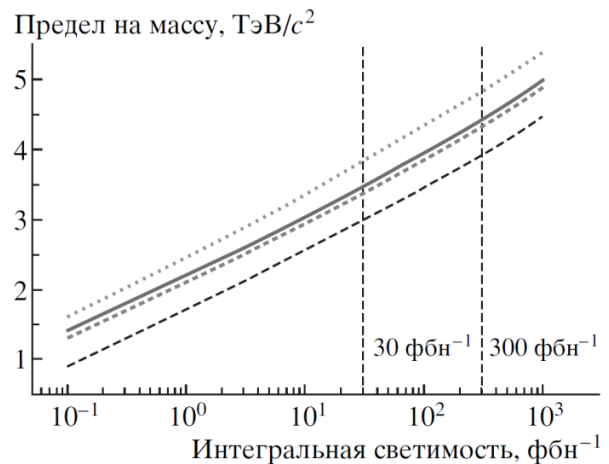
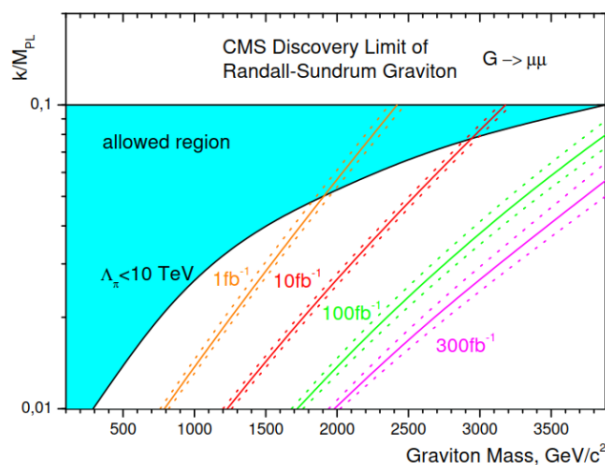


Рис. 3. Левый – ожидаемые экспериментальные ограничения в пространстве модельных параметров [3]. Правый – верхний предел, соответствующий статистической значимости более 5σ для разных значений интегральной светимости, на массу Z' бозона при распаде на $\mu^+\mu^-$ для (кривые сверху вниз) SSM, χ -модели, ALRM и ψ -модели для pp -соударений при $\sqrt{s} = 14$ ТэВ [4].

2. Проверка предсказаний СМ в процессе Дрелла-Яна

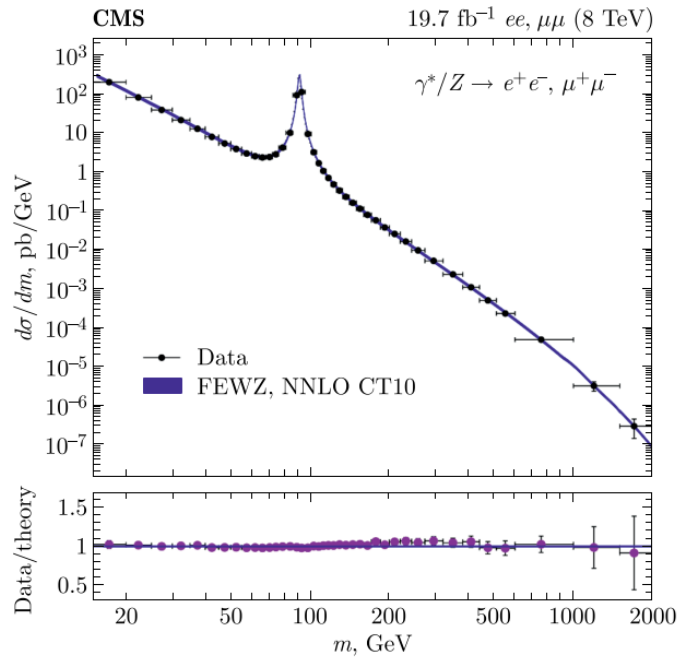
Измерения характеристик процесса Дрелла-Яна во время первого этапа работы LHC основаны на данных протон-протонных столкновений при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ [12, 14, 16, 20,

25], набранных в эксперименте CMS с суммарной статистикой, соответствующей интегральной светимости (\mathcal{L}_{int}) 4.5 fb^{-1} и 19.7 fb^{-1} . Для увеличения статистической значимости осуществлялось объединение данных в каналах с парой мюонов и парой электронов.

2.1. Измерение дифференциального и дважды дифференциального сечений

Впервые измерены дифференциальное сечение $d\sigma/dm$ процесса Дрелла–Яна в области значений инвариантной массы пары лептонов m от 15 до 2000 ГэВ/ c^2 (рис. 4) и дважды дифференциальное сечение $d^2\sigma/dmdu$ в области масс от 20 до 1500 ГэВ/ c^2 и быстроты пары $|y| \leq 2.4$ (рис. 5) [16, 25]. Исследованные кинематические области соответствуют недоступным для измерения в предыдущих экспериментах диапазонам значений масштабной переменной Бьёркена $3 \times 10^{-4} \leq x \leq 1.0$ и переданного четырехимпульса $6.0 \times 10^2 \leq Q^2 \leq 7.5 \times 10^5 \text{ ГэВ}^2/c^4$. Дифференциальное сечение $d\sigma/dm$ измерено в более широком интервале $3.0 \times 10^2 \leq Q^2 \leq 10^6 \text{ ГэВ}^2/c^4$.

Рис. 4. Дифференциальное сечение $1/\sigma_Z d\sigma/dm$ рождения пар лептонов (e^+e^- и $\mu^+\mu^-$) в процессе Дрелла–Яна [16]. Приведено отношение экспериментальных данных и предсказаний СМ в NNLO КХД и NLO ЭС. Вычисления сделаны в FEWZ3.1 с PDF CT10.



Величина измеренных сечений находится в хорошем согласии с предсказаниями СМ (NNLO КХД и NLO ЭС) во всей области инвариантных масс от 15 до 2000 ГэВ/ c^2 . В частности, в области вокруг пика Z^0 -бозона (60–120 ГэВ/ c^2) значение сечения (e^+e^- и $\mu^+\mu^-$) составило 986.4 ± 0.6 (стат.) ± 5.9 (эксп. сист.) ± 21.7 (теор. сист.) ± 21.7 (свет.) пб и 1138 ± 8 (эксп.) ± 25 (теор.) ± 30 (свет.) пб, соответственно для $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ [12, 16], что является наиболее точным измерением на адронных коллайдерах и хорошо согласуется как с предыдущими измерениями в эксперименте CMS, так и с вычислениями СМ в NNLO (соответственно, $\sigma_Z^{\text{теор}}(7 \text{ ТэВ}) = (1009 \pm 32)$ пб и $\sigma_Z^{\text{теор}}(8 \text{ ТэВ}) = (1137 \pm 36)$ пб), а также с измерениями эксперимента ATLAS. Эти результаты были подтверждены независимыми измерениями в канале с парой электронов и в канале с парой мюонов, которые также совпадают.

2.2. Измерение энергетической зависимости сечений

Важной для тестирования функций распределения кварков и глюонов в нуклоне (PDF) характеристикой является энергетическая зависимость сечений, которая, к тому же, чрезвычайно чувствительна к эффектам высших порядков КХД. Эта зависимость получена [16] с помощью измерения отношения сечений R при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ в различных интервалах по инвариантной массе m и скорости пары (рис. 6). Для уменьшения систематических погрешностей сечения во всей области m нормированы на сечения в области m_Z .

Форма распределений R не противоречит ожиданиям СМ с учетом зависимости PDF от энергетического масштаба взаимодействий Q и переменной x : в области малых x

наблюдается линейный рост отношения к функции логарифма массы (при этом в области Z^0 -пика отношение равно 1 по определению), а, начиная с $x \sim 0.3$ ($m \sim 200$ ГэВ/ c^2), следует быстрый рост, обусловленный повышением доступного масштаба взаимодействия для $\sqrt{s} = 8$ ТэВ. В пределах статистических погрешностей измерения отношение R согласуется с теоретическим предсказанием.

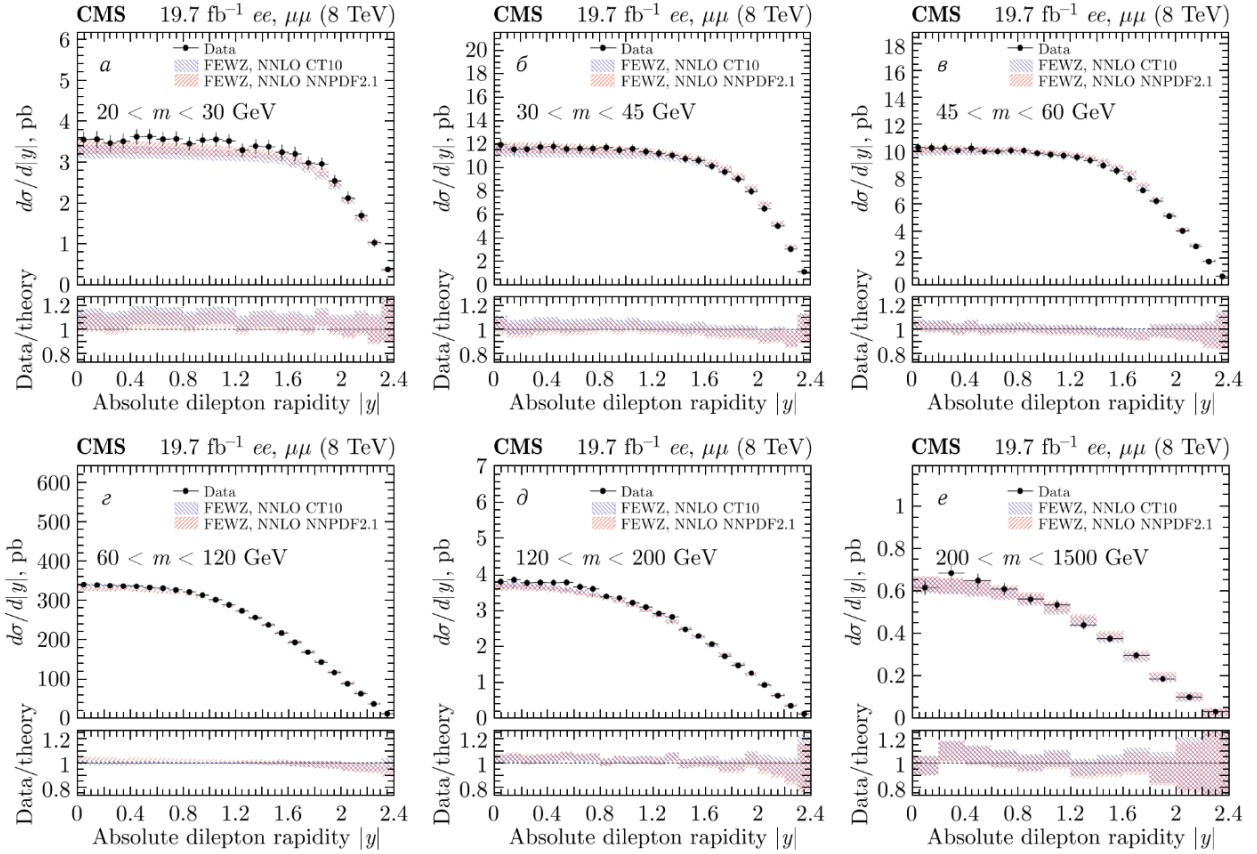


Рис. 5. Дифференциальное сечение $d\sigma/dy$ рождения пар лептонов (e^+e^- и $\mu^+\mu^-$) в процессе Дрелла–Яна в различных интервалах m [16]. На нижних панелях для каждого случая приведено сравнение экспериментальных данных и предсказаний СМ в NLO ЭС и NNLO КХД. Вычисления сделаны в FEWZ3.1 с PDF CT10 и NNLO NNPDF2.1

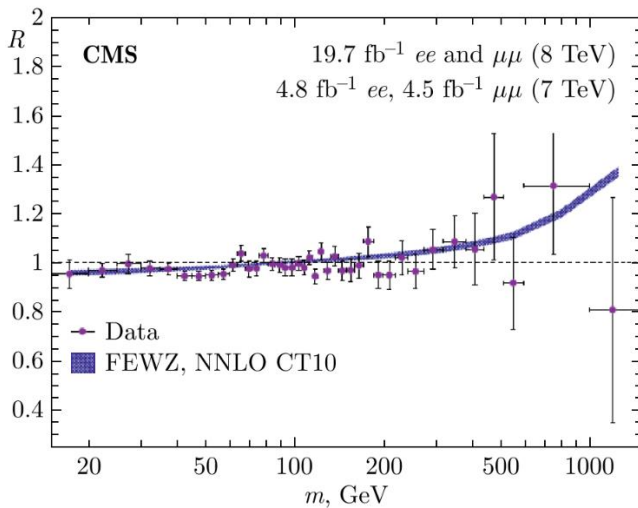


Рис. 6. Отношение сечений $1/\sigma_Z d\sigma/dm$, измеренных при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ, в зависимости от инвариантной массы лептонной пары [16]. Приведены NNLO-вычисления СМ (FEWZ) с PDF CT10.

Исследование данного отношения в различных интервалах быстроты показало, что при небольших значениях масс оно практически не зависит от быстроты пары, но с увеличением значения массы демонстрирует довольно сильный рост до 20%. Полученные результаты были использованы для уточнения функций распределения легких

кварков в области $10^{-4} \leq x \leq 0.5$ — в наборе PDF NNPDF 3.0 неопределенности валентных кварков были уменьшены на 15–20 %, а морских — до 40 %.

3. Поиск сигналов новой физики

На полной статистике RUN1 и RUN2 при $\sqrt{s} = 7, 8$ и 13 ТэВ выполнена серия экспериментов [8–11, 15, 17–19, 21–24, 26–34], нацеленных на обнаружение сигналов новой физики, предсказываемых теориями с расширенным калибровочным сектором, моделями многомерной гравитации с пониженным масштабом взаимодействия и эффективными моделями с частицами темной материи и переносчиками взаимодействий из темного в обычный сектор материи. Осуществлен поиск новых резонансов со спином 1 и спином 2, а также нерезонансных сигналов. В отсутствие значимого превышения сигнала над ожидаемым фоном СМ установлен модельно-независимый верхний предел (95% С.Л.) на сечения этих процессов и получены принципиально новые ограничения в пространстве модельных параметров проанализированных сценариев. Также впервые проверена универсальность взаимодействий в лептонном секторе в области переданных 4-импульсов до 3 ТэВ/c². Ниже приведены результаты с наиболее сильными ограничениями, полученные на максимальной статистике ($\mathcal{L}_{int}=140$ фбн⁻¹), собранной экспериментом CMS во время RUN2 LHC.

3.1. Поиск новых тяжелых резонансов со спином 1 и спином 2

Поиск новых резонансов проводился с помощью метода максимального правдоподобия путем анализа формы распределения пар лептонов по их инвариантной массе (рис. 7). Такой подход обеспечивает независимость результатов от погрешности определения абсолютной величины фона. Для уменьшения влияния других систематических эффектов (светимости, акцептанса, эффективностей триггера и оффлайн реконструкции) сечение рождения пар лептонов было нормировано на сечение рождения Z^0 -бозона. Интерпретация формы распределений по инвариантной массе осуществлялась в рамках байесовского подхода к оценке вероятностей.

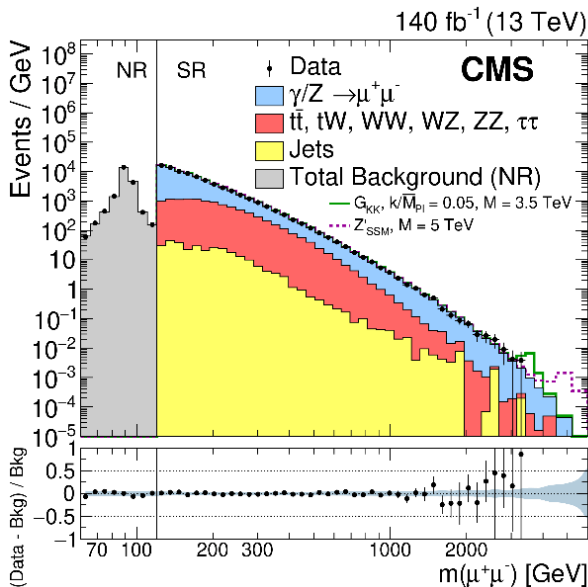


Рис.7. Распределения по инвариантной массе пар мюонов, полученные в нашем анализе при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [34].

При отсутствии значимого превышения наблюдаемых событий над ожидаемым фоном с уровнем достоверности (С. Л.) 95 % определен верхний предел на сечение рождения пар лептонов R_σ в присутствии новых тяжелых резонансов. Модельно-независимые верхние пределы на сечения рождения резонансных состояний со спином 1 и спином 2 измерялись в приближении узкого резонанса (NWA) последовательно

при $\sqrt{s} = 7, 8$ и 13 ТэВ. На рисунке 8 представлены результаты извлечения наблюдаемых (экспериментально установленных) пределов на данных RUN2 при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [34]. Стабильность используемого метода анализа данных подтверждается независимостью результатов от ширины используемого для аппроксимации массового интервала и формы распределения фона при ее вариации в пределах ошибок (вариация предела на величину R_σ не превышает 5 %).

Результаты поиска резонансов интерпретировались в рамках расширенных калибровочных моделей, основанных на группах ТВО E_6 и $SO(10)$, и модели многомерной гравитации с пониженным масштабом взаимодействия с метрикой многомерного пространства анти-де Ситтера AdS_5 (сценарий Рэндалл–Сандрума, тип 1 – RS1). В общем случае модельно-независимый предел, приведенный на рисунке 8, может быть использован для установления ограничений на массу новых резонансов в рамках любой теоретической модели. В качестве референсных рассмотрены два сценария нового тяжелого резонанса — со спином 1 (дополнительный калибровочный бозон Z') и со спином 2 (КК-моды RS1-гравитона).

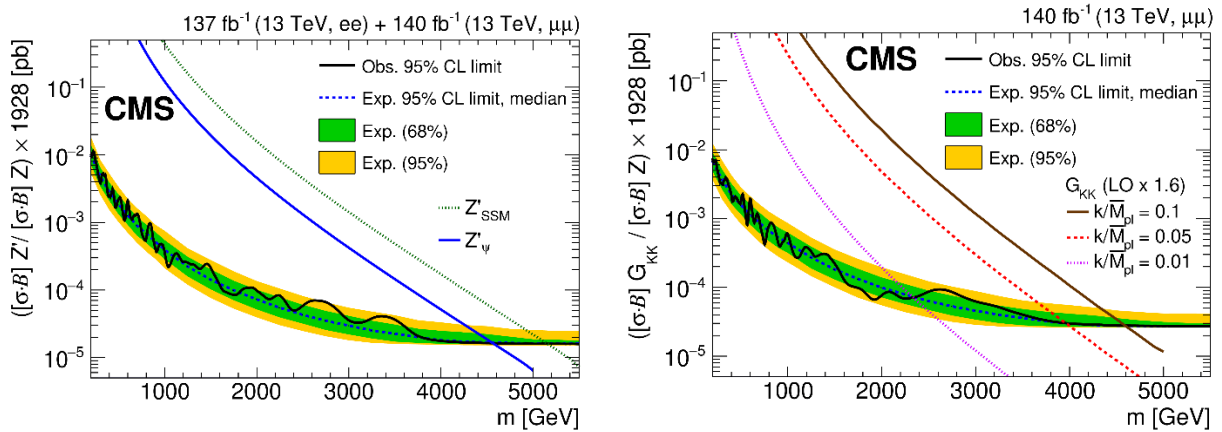


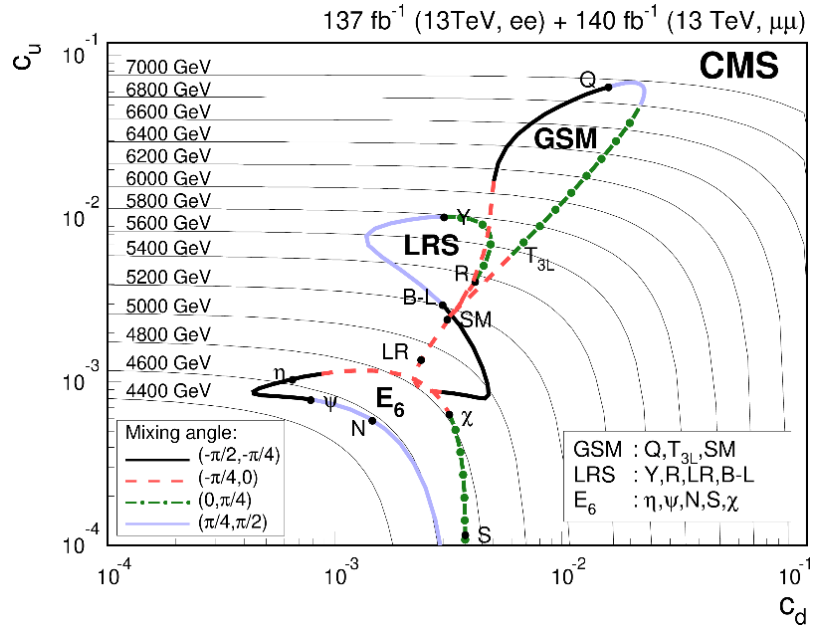
Рис. 8 Модельно-независимый верхний предел (95% CL) на сечение рождения пар мюонов (черная сплошная линия), нормированное на сечение рождения Z^0 -бозона, для случая резонансов со спином 1 (слева) и спином 2 (справа) [34]. Пунктирная линия отвечает ожидаемому пределу в случае СМ (основанному на моделировании). Закрашенные области вокруг пунктирной линии соответствуют 68% и 95% стандартным отклонениям. Также приведены теоретические предсказания для сечений рождения новых калибровочных бозонов (модели SSM и Z'_ψ) и КК-состояния гравитона для разных констант связи сценария многомерной гравитации RS1.

Сравнение наблюдаемых верхних пределов с теоретическими предсказаниями позволили установить принципиально новые экспериментальные ограничения на массы тяжелых резонансов, предсказываемых этими моделями, и ряд других модельных параметров. В канале с парой мюонов существование новых нейтральных калибровочных бозонов исключено при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ (рис.8, левый) в области масс менее 4.89 ТэВ/ c^2 для модели SSM и 4.29 ТэВ/ c^2 для ψ -модели (одного из сценариев ТВО) [33, 34]. При объединении данных в канале рождения пар мюонов и пар электронов эти пределы расширяются, соответственно, до 5.15 ТэВ/ c^2 и 4.56 ТэВ/ c^2 . В зависимости от значения отношения кривизны многомерного пространства анти-де Ситтера k и фундаментальной массы Планка (0.01–0.1) сценария RS1, ограничения на массу КК-состояния гравитона составили 2.34–4.59 ТэВ/ c^2 в канале $\mu^+\mu^-$, при этом комбинированный ($\mu^+\mu^-$ и e^+e^-) предел достигает 2.47–4.78 ТэВ/ c^2 (рис. 8, правый). Данные ограничения существенно улучшают предыдущие измерения в дилептонном канале как при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ [8, 9, 10, 11, 13, 17, 18, 19, 21, 22], так и при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ на неполном объеме данных [23, 24, 26, 28–32]. Эти результаты также полученные при определяющем участии членов авторского коллектива.

Экспериментальные пределы на сечения рождения пар лептонов также использовались для установления экспериментальных ограничений на массы новых калибровочных бозонов в пространстве модельных параметров, зависящих от значений констант связи и углов смешивания в различных моделях (рис. 9) [33, 34]. Полученные экспериментальные пределы в пространстве (c_u, c_d) позволяют не только расширить их на произвольную теоретическую модель (с феноменологической точки зрения расширенные калибровочные модели отличаются друг от друга только величинами констант связи), но и, в случае

экспериментального обнаружения Z' , произвести отбор соответствующего ему расширения СМ.

Рис. 9. Предел (95% CL) на массы бозона Z' в пространстве параметров (c_u, c_d) [34]. Тонкими линиями показаны контуры экспериментальных верхних пределов на величину (c_u, c_d) для различных масс резонанса. Жирные цветные кривые соответствуют предсказаниям расширенных калибровочных моделей GSM, LR и E_6 при различных значениях параметра смешивания.



Обобщением результатов, полученных в ходе RUN1 и RUN2, сделаны предсказания (рис. 10) на массовые пределы нового тяжелого бозона Z' расширенного калибровочного сектора СМ, которые могут быть достигнуты при работе LHC в режиме высокой светимости (1000–3000 fb^{-1}), с учетом последних данных CMS [23]. Для модели SSM предсказано наступление кинематического предела в районе около 7 ТэВ/ c^2 при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, что соответствует 7–8 ТэВ/ c^2 при $\sqrt{s} = 14$ ТэВ.

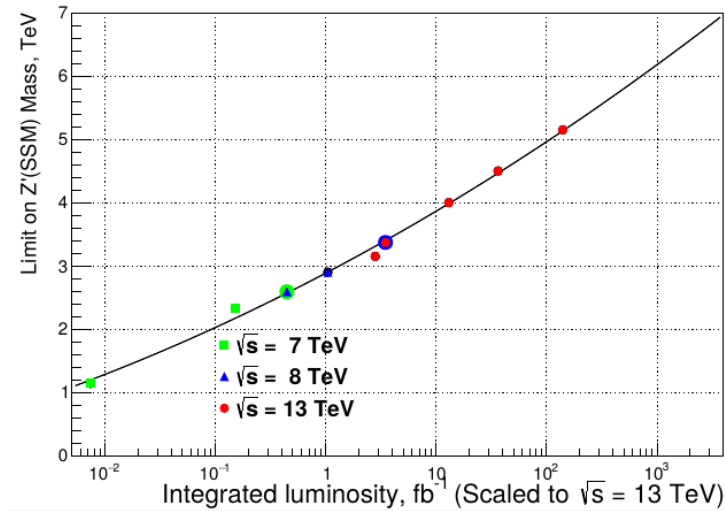


Рис. 10. Наблюдаемые при энергии в с.с.м. 7, 8 и 13 ТэВ массовые пределы для гипотетического калибровочного бозона Z' в модели SSM в зависимости от интегральной светимости [23].

3.2. Поиск нерезонансных сигналов

При поиске в спектре пар лептонов сигналов нерезонансного типа для интерпретации наблюдаемых массовых спектров использовался метод подсчета числа событий в ограниченной снизу сигнальной области значений инвариантных масс пар лептонов [17, 31, 33, 34]. Как видно из распределения пар мюонов по $m_{\mu\mu}$, представленного на рисунке 11 (левый), отклонения наблюдаемых событий от предсказанного фона СМ не наблюдается. Полученные результаты были интерпретированы в рамках сценария больших

дополнительных измерений ADD с двумя схемами перенормировки (HLZ и GRW), а также в рамках моделей контактных взаимодействий фермионов.

Установлены верхние пределы на сечение процесса нерезонансного рождения пар мюонов с виртуальным обменом КК-состояниями гравитона и получены принципиально новые экспериментальные ограничения на фундаментальный масштаб многомерной гравитации Λ_T и M_S в альтернативном описании, в зависимости от числа дополнительных измерений n в модели ADD (пример $\sqrt{s} = 13$ ТэВ приведен на рис. 11, правый) [34]. Аналогично случаю поиска резонансного сигнала, пределы определены как независимо в каналах $\mu^+\mu^-$ и e^+e^- , так и в объединенном дилептонном канале.

На основе данных RUN2 LHC ограничения на значение M_S для числа $n = 3-7$ на уровне достоверности 95 % составили 5.8–8.6 ТэВ, а на величину $\Lambda_T - 7.2$ ТэВ [34]. Комбинированный анализ мюонного и электронного каналов установил более сильные пределы: $M_S \geq 5.9-8.9$ ТэВ и $\Lambda_T \geq 7.5$ ТэВ. Масштаб контактных взаимодействий был ограничен значениями $\Lambda > 23.9-35.8$ ТэВ в зависимости рассматриваемой модели.

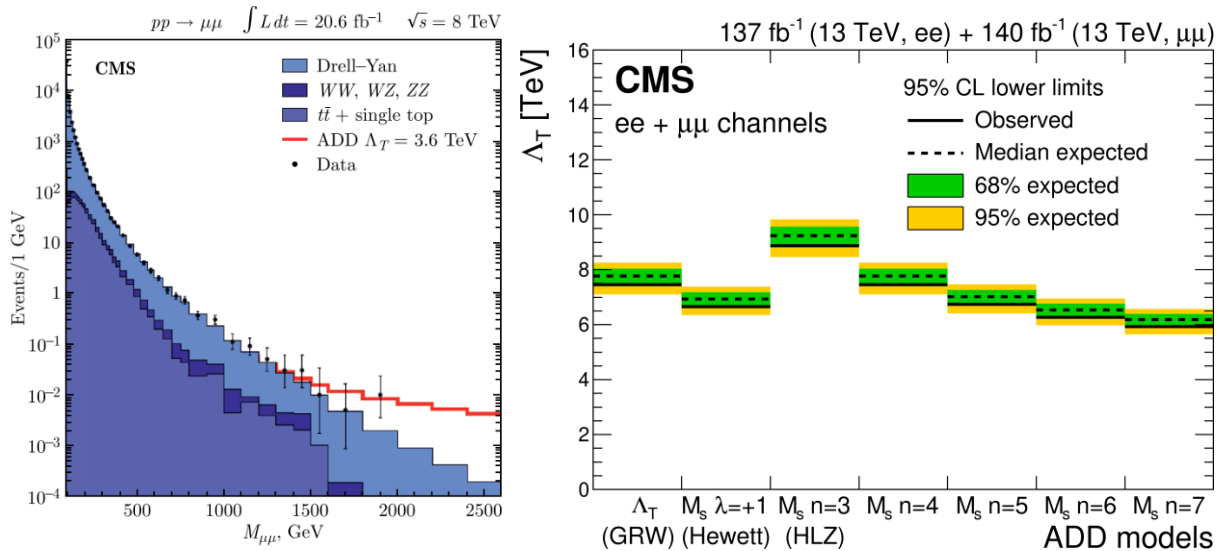


Рис. 11. Левый – распределение числа событий по инвариантной массе димюонов в конечном состоянии, полная статистика первого сеанса работы LHC $\sqrt{s} = 8$ ТэВ. Правый – верхний предел (95% C.L.) на масштаб многомерной гравитации в рамках различных схем перенормировки GRW (Λ_T) и HLZ (M_S) при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [34]. Результаты для схемы HLZ приведены в зависимости от числа дополнительных измерений n .

3.3. Поиск кандидатов на роль частиц темной материи

В канале с парой противоположно заряженных лептонов проведен экспериментальный поиск переносчика взаимодействия между полями СМ и сектором темной материи [33, 34]. В отсутствие значимого превышения сигнала над ожидаемым фоном СМ в рамках упрощенной модели ТМ (с одной дираковской частицей-кандидатом на роль ТМ и одним переносчиком) установлены верхние пределы (95% C.L.) на массы частиц ТМ и аксиально-векторного и векторного переносчиков (рис. 12).

В предположении векторного переносчика с подавленной константой связи с лептонами ($g_q = 0.1$, $g_l = 0.01$) ограничения на массу переносчика m_{med} составили 1.92 ТэВ/ c^2 при больших значениях масс частиц-кандидатов на роль ТМ (рис. 12, левый). В случае одинаковых констант связи аксиально-векторного переносчика с лептонами и кварками ($g_q = 0.1 = g_l = 0.1$) ограничения на m_{Med} существенно выше и достигают 4.64 ТэВ/ c^2 (рис. 12, правый). В области малых масс частиц ТМ ($m_{\text{DM}} = 0$) массовые пределы на переносчики несколько ниже и составляют, соответственно, 1.04 ТэВ/ c^2 и 3.41 ТэВ/ c^2 .

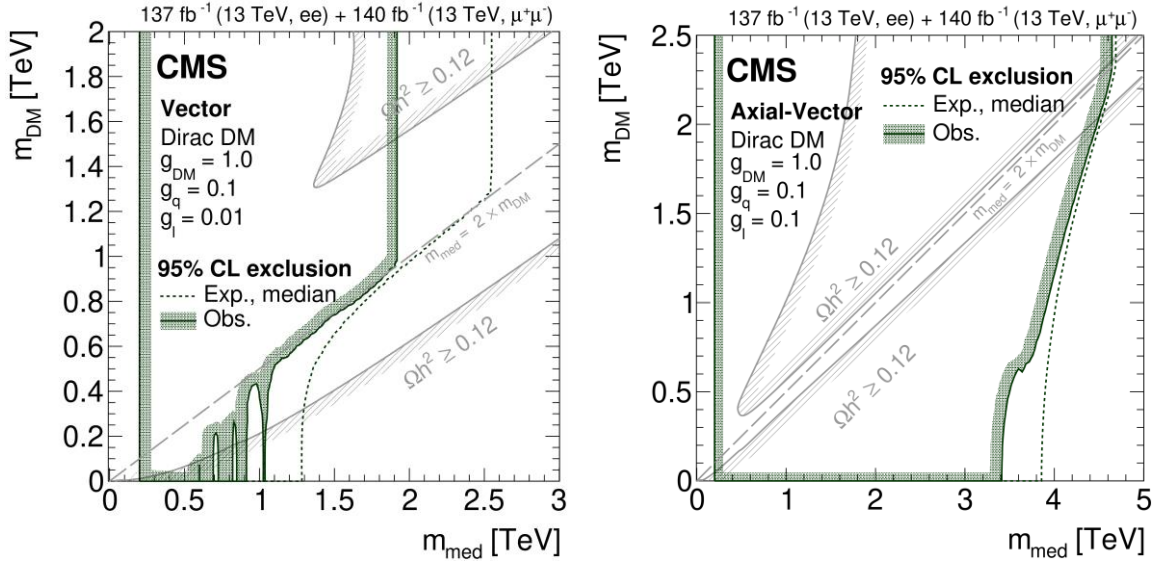
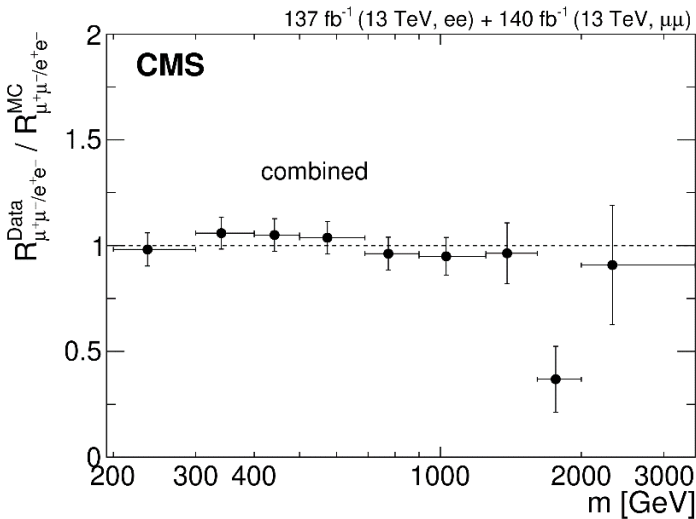


Рис. 12. Ограничения (95% C.L.) на массы дираковских частиц темной материи m_{DM} и переносчика взаимодействия m_{Med} [34]. В рамках упрощенной модели рассмотрены случаи (слева) векторного и (справа) аксиально-векторного переносчика. Области внутри зеленых контуров дают исключенную область масс. Области $\Omega h^2 \geq 0.12$ отвечают значениям параметров, исключенным по астрофизическим соображениям (в этих областях для минимальных эффективных моделей взаимодействия темной и обычной материи плотность реликтовой ТМ превышает наблюдаемую).

3.4. Проверка универсальности взаимодействий в лептонном секторе

Выполнено исследование, направленное на обнаружение процессов, идущих с нарушением лептонного числа – в распадах на пары мюонов и электронов проверена универсальность взаимодействий в лептонном секторе (Lepton Flavour Universality Violation, LFUV) [34]. СМ утверждает, что бозоны, в частности, Z-бозон, распадаются на мюонные и электронные пары с одинаковой вероятностью. Однако, если СМ неполна, в данных могут содержаться указания на предпочтительность распада по первому или второму каналу. На статистике RUN2 при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ эксперимент CMS впервые смог проверить эту гипотезу в области больших инвариантных масс. Значимых указаний на подобные электронные или мюонные «предпочтения» в распадах обнаружено не было (хотя присутствуют небольшие отклонения, связанные с избытком событий в электронном канале в области самых



больших масс, за которыми предполагается пристальное наблюдение в будущем). Полученное отношение показано на рисунке 13.

Рис. 13. Отношение вероятностей распада Z-бозона по электронному и мюонному каналу, полученное в эксперименте CMS; для сравнения показано также предсказание СМ (пунктирная линия) [34].

4. Заключение

В 2002 г. физиками ОИЯИ в эксперименте CMS было инициирована программа по изучению процесса рождения пары мюонов высоких энергий. На основании исследований, проведенных в 2002–2009 гг., было получено физическое обоснование и детально проработана постановка серии экспериментов в канале с парой лептонов, направленных на проверку предсказаний Стандартной модели взаимодействий и поиск сигналов новой физики. Выполненные работы сформулировали программу научных исследований эксперимента CMS в канале с парой мюонов в конечном состоянии. Предложенная программа легла в основу соответствующих глав проектов коллаборации CMS “CMS Physics Technical Design Report Vol. I и Vol. II”, определяющих стратегию и методы научных исследований коллаборации.

В 2010–2015 гг. коллаборацией CMS с определяющим участием физиков из ОИЯИ были получены новые уникальные данные о взаимодействиях частиц SM при рекордных энергиях, которые были достигнуты во время первого цикла работы LHC: при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ измерены дифференциальные и дважды дифференциальные сечения процесса рождения лептонных пар в областях переменной Бьёркена и переданного четырехимпульса, ранее недоступных для изучения, и с рекордной точностью измерено сечение Z^0 -бозона.

В 2010–2021 гг. на данных RUN1 и RUN2 LHC при $\sqrt{s} = 7, 8$ и 13 ТэВ выполнена серия поисковых экспериментов, нацеленных на обнаружение сигналов новой физики, предсказываемых теориями с расширенным калибровочным сектором, моделями многомерной гравитации, сценариями с кандидатами в частицы темной материи, а также осуществлена проверка универсальности взаимодействий в лептонном секторе и выполнен ряд других исследований. По ситуации на сегодняшний день каких-либо значимых проявлений новой физики в распределениях дилептонов с большими инвариантными массами обнаружено не было. Хотя даже сам факт их отсутствия способен сказать достаточно много о физике за пределами SM и об используемых моделях. На данных CMS получены самые сильные из когда-либо существовавших ограничений на массы гипотетических новых частиц, которые могли бы распадаться на пару лептонов, для широкого класса теорий. Также получены уникальные ограничения на параметры моделей, предсказывающих нерезонансные отклонения от фона: модели специального вида с дополнительными пространственными измерениями или новые взаимодействия контактного типа между частицами.

Все работы выполнены под руководством или при определяющем участии членов авторского коллектива. Физики ОИЯИ являлись ответственным за проведение исследований, подготовку публикаций и разделов проектов эксперимента CMS по физической программе с дилептонами. Они принимали личное непосредственное участие в проведении обработки и анализа экспериментальных данных первого и второго этапа работы LHC, входили в число авторов внутриколлаборационных препринтов с ограниченным числом авторов с включением физиков других институтов, на основании которых были опубликованы статьи CMS.

Результаты докладывались членами авторского коллектива 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), рабочих совещаниях коллаборации CMS; ежегодных конференциях коллаборации RDMS CMS, на международных рабочих совещаниях, научных школах, конференциях и симпозиумах (всего более 200 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».

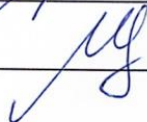
Результаты опубликованы в ведущих зарубежных и отечественных рецензируемых журналах, а также в виде материалов научных мероприятий и глав монографий (всего в цикле представлено 34 работы). Основные результаты включены в регулярные обзоры по физике частиц Particle Data Group за 2012–2020 гг. По материалам исследований подготовлены и защищены 3 докторские, 2 кандидатские и 1 PhD диссертации.

Председатель НТС ЛФВЭ _____



Е.А. Строковский

Секретарь НТС ЛФВЭ _____



С.П. Мерц