= ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ =

ФИЗИКА ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS НА LHC

© 2021 г. В. В. Шалаев^{1),2)*}, С. В. Шматов^{1),2)**}

Поступила в редакцию 14.05.2020 г.; после доработки 14.05.2020 г.; принята к публикации 14.05.2020 г.

В работе представлен обзор результатов изучения электрослабых взаимодействий, полученных в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере.

DOI: 10.31857/S0044002721010207

Проведение прецизионных измерений различных характеристик электрослабых процессов (ЭС) при рекордных, доступных на Большом адронном коллайдере (LHC), значениях энергии взаимодействия элементарных частиц является неотъемлемой частью научной программы экспериментов в CERN. Эти исследования представляют собой важнейший тест Стандартной модели (СМ) в новой области энергий и закладывают основу для проведения поисковых экспериментов, нацеленных на обнаружение новой физики.

В работе представлен обзор результатов изучения электрослабых взаимодействий, полученных одним из двух многоцелевых экспериментов на LHC — "Компактным мюонным соленоидом" (CMS) [1] — во время первого (RUN1) и второго (RUN2) этапов работы LHC. Энергия взаимодействия пучков протонов в течение RUN1 составляла $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ, а RUN2 проводился практически при проектной энергии LHC $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Ожидается, что на проектную энергию ($\sqrt{s} = 14$ ТэВ) LHC выйдет к третьему этапу (RUN3).

Одним из важнейших направлений исследований ЭС процессов является изучение свойств переносчиков взаимодействий — калибровочных бозонов Z и W: измерение полных и дифференциальных сечений, вероятностей распада, масс и других характеристик различных ЭС процессов образования частиц. Результаты измерений, выполненные во время RUN1 и RUN2, полностью согласуются друг с другом и с предсказаниями СМ в первом (NLO), а в ряде случаев и во втором (NNLO), порядке теории возмущений. В частности, энергетическая зависимость полных сечений рождения Z- и Wбозонов демонстрирует ожидаемый рост (рис. 1a), а сами значения сечений с учетом вероятностей распада не выходят в пределах погрешностей за пределы теоретических ожиданий (рис. 1 δ) и не противоречат принципу лептонной универсальности в новой области энергий [2].

При изучении электрослабых процессов большое внимание уделяется измерениям характеристик процесса Дрелла-Яна [3] (сечений, их энергетических зависимостей, угловых распределений и пространственной асимметрии частиц в конечном состоянии). Этот процесс является не только чувствительным инструментом для поиска сигналов физики за рамками СМ, но и одним из источников фонов при исследовании парного рождения топ-кварков, калибровочных бозонов, поиска и измерения свойств бозона Хиггса в канале распада на 4 лептона. В настоящее время результаты по измерению дважды дифференциального сечения $d^2\sigma/dmdy^Z$ (*m*—инвариантная масса, а y^{Z} — быстрота пары лептонов), полученные во время RUN1 и RUN2, покрывают диапазон значений переменной Бъеркена $3 \times 10^{-4} < x <$ < 1.0 и квадрата переданного четырехимпульса $6 \times 10^2 < Q^2 < 7.5 \times 10^5$ Гэ B^2/c^4 [4]. Дифференциальное сечение $d\sigma/dm$ измерено в более широком диапазоне $3 \times 10^2 < Q^2 < 3 \times 10^6$ ГэВ²/ c^4 . Измерение зависимости сечений от поперечного импульса калибровочных бозонов p_T^Z , а также от их быстроты y^{Z} , важно для получения ограничений на структурные функции протона (PDF) и проверки предсказаний различных генераторов событий (см. например, рис. 2) [8]. Кроме того, анализ угловых распределений лептонов, образующихся в процессе Дрелла-Яна, позволяет провести измерения эффективного слабого угла смешивания sin $^2 heta^l_{ ext{eff}}.$ Результаты CMS для объединенного канала

¹⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

²⁾Государственный университет "Дубна", Дубна, Россия.

^{*}E-mail: vladislav.shalaev@cern.ch

^{**}E-mail: sergei.shmatov@cern.ch



Рис. 1. *а* — полные сечения рождения калибровочных бозонов в зависимости от \sqrt{s} . Приведены результаты эксперимента CMS и экспериментов на Тэватрон и SPS [2]; *б* — значения сечений калибровочных бозонов, полученные в разных каналах, и отношение измеренных и предсказанных в CM значений [2].



Рис. 2. Отношение теоретических предсказаний и экспериментальных данных для дифференциального сечения процесса Дрелла–Яна по (*a*) быстроте $|y^Z|$ и (*б*) поперечному импульсу p_T^Z пары лептонов ($e^+e^- + \mu^+\mu^-$). Для теоретических расчетов использованы генераторы FEWZ [5], MadGraph [6] и POWHEG [7].

 $(e^+e^- + \mu^+\mu^-)\sin^2\theta^l_{eff} = 0.23101 \pm 0.00036(стат.) \pm \pm 0.00018(сист.) \pm 0.00016(теор.) \pm 0.00031(PDF)$ [9] хорошо согласуются с результатами экспериментов ATLAS [10] и LHCb [11].

С увеличением набранной статистики становится возможным изучение процессов парного и тройного рождения калибровочных бозонов и измерение, соответственно, констант связи трех- и четырехбозонных вершин (triple and quartic gauge boson couplings, TGC и QGC). Ряд сценариев новой физики, описываемых в рамках эффективной теории поля, предсказывает аномальное увеличе-

ЯЛЕРНАЯ ФИЗИКА

том 84 № 1 2021

ние интенсивности взаимодействий за счет присутствия в лагранжиане членов высших размерностей. Таким образом, эти процессы являются важным "пробником" физики за пределами СМ. В эксперименте CMS изучение парного рождения калибровочных бозонов проводилось в каналах с заряженным (вершины TGC $WW\gamma$ и WWZ) и нейтральными (вершины TGC $Z\gamma\gamma ZZ\gamma$) токами [12]. К настоящему времени сечения множественного рождения калибровочных бозонов находятся в хорошем согласии с предсказаниями СМ в NNLO (см. рис. 3) и никаких признаков аномального пове-

ШАЛАЕВ, ШМАТОВ



Рис. 3. Отношение экспериментальных данных и теоретических предсказаний (в NNLO) для полных сечений парного рождения калибровочных бозонов.



Рис. 4. Допустимый (95% С.L.) интервал параметров аномальной трехбозонной вершины ТGC WWZ.



Рис. 5. *а* — распределение зарегистрированных событий (черные точки) по инвариантной массе пар мюонов. Также приведены результаты фитирования сигнальных (заштрихованные области) и фоновых (точечные кривые) событий [14]; δ — измеренные вероятности распадов $Br(B_s^0 \to \mu^+ \mu^-)$ и $Br(B^0 \to \mu^+ \mu^-)$ в эксперименте CMS (крест) с пятью областями (контуры), соответствующими 1–5 среднеквадратичным отклонениям [14]. Также приведены предсказания CM (квадрат).

дения констант связи не обнаружено. В отсутствие значимых отклонений от предсказаний СМ были установлены пределы (95% С.L.) на значения параметров вершин TGC (рис. 4). Изучение четырехбозонных вершин осуществлялось в каналах с тремя калибровочными бозонами в конечном состоянии $(W^{\pm}W^{\pm}W^{\mp}, W\gamma\gamma, Z\gamma\gamma)$, а также в каналах ассоциированного рождения пары калибровочных бозонов и струй в процессах слияния калибровочных бозонов $(W^{\pm}W^{\pm}jj)$ и $ZW^{\pm}jj)$ [13]. На текущем уровне точности результаты также не продемонстрировали аномального поведения QGC.

Одной из уникальных возможностей экспериментов на LHC является возможность вплотную подойти к измерению редких распадов. Например, лептонные распады $B_s^0 \to \mu^+\mu^-$ и $B^0 \to \mu^+\mu^-$, осуществляющиеся в СМ за счет меняющих аромат нейтральных токов (FCNC), сильно подавлены и характеризуются крайне малой вероятностью $(3.66 \pm 0.14) \times 10^{-9}$ и $(1.03 \pm 0.05) \times 10^{-10}$ соответственно. Любые отклонения данных эксперимента от предсказанных величин могут свидетельствовать о проявлении новой физики. Благодаря высокой эффективности регистрации пар мюонов и предоставляемой ускорительным комплексом LHC рекордной светимости в эксперименте CMS [14] удалось зарегистрировать распад $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ со статистической значимостью 5.6 ги измерить величину его вероятности, которая составила ($2.9 \pm$

 $\pm 0.27) \times 10^{-9}$ (рис. 5) [14]. В то же время на существующей статистике увидеть распад $B^0 \to \mu^+\mu^-$ пока не удалось — установлен верхний предел (95% С.L.) на вероятность этого процесса $Br(B^0 \to \mu^+\mu^-) < 3.6 \times 10^{-9}$ (рис. 56) [14]. Полученные результаты не противоречат предсказаниям СМ.

Особый интерес к процессам одиночного рождения t-кварка вызван их чувствительностью к вкладам новой физики, изменяющим значения констант связи вершины *tWb*. Непрямые измерения элемента матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы (ККМ) Vtb неоднократно проводились в экспериментах с t-кварками [15] и B-адронами [16] в предположении унитарности матрицы ККМ и фиксированном числе (равным трем) поколений кварков в СМ. В свою очередь, прямая оценка этого матричного элемента, основанная на измерении сечений процессов одиночного рождения tкварка, свободна от этих предположений. На рис. 6 представлены результаты измерения величины $|V_{tb}|$ в разных каналах рождения *t*-кварка [17]. Данные экспериментов CMS и ATLAS демонстрируют полное согласие друг с другом и с теоретическими предсказаниями СМ.

В заключение можно отметить, что в настоящее время все результаты исследований ЭС процессов в экспериментах на LHC находятся в полном согласии с предсказаниями СМ. Кроме того, были

ШАЛАЕВ, ШМАТОВ



Рис. 6. Величина матричного элемента V_{tb} , измеренная в экспериментах ATLAS и CMS в процессах одиночного рождения t-кварка [17].

обнаружены и изучены редкие процессы, которые были теоретически предсказаны, но ранее не наблюдались (например, ассоциированное рождение tW и распад $B^0_s
ightarrow \mu^+\mu^-$). Дальнейшее увеличение статистики экспериментальных данных будет способствовать повышению точности измерений и обеспечит наблюдение редких процессов, ожидаемых в рамках СМ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90212 и гранта для молодых ученых и специалистов ОИЯЙ № 20-102-09.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. S. Chatrchyan et al. (CMS collab.), JINST 3, S08004 (2008).
- 2. A. M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), CMS-PAS-SMP-15-004, CERN (Geneva, 2015); JHEP 1912, 061 (2019), arXiv: 1909.04133.
- 3. S. D. Drell and T.-M. Yan, Phys. Rev. Lett. 25, 316 (1970); Phys. Rev. Lett. 25, 902 (Erratum) (1970).
- 4. V. Khachatryan et al. (CMS Collab.), Eur. Phys. J. C 75, 147 (2015), arXiv: 1412.1115.
- 5. R. Gavin, Y. Li, F. Petriello, and S. Quackenbush, Comput. Phys. Commun. 182, 2388 (2011), arXiv: 1011.3540.
- 6. J. Alwall, R. Frederix, S. Frixione, V. Hirschi, F. Maltoni, O. Mattelaer, H.-S. Shao, T. Stelzer,

P. Torrielli, and M. Zaro, JHEP 1407, 079 (2014), arXiv: 1405.0301.

- 7. S. Frixione, P. Nason, and C. Oleari, JHEP 0711, 070 (2007), arXiv: 0709.2092.
- 8. A. M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), JHEP 1912, 061 (2019), arXiv: 1909.04133.
- 9. A. M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), Eur. Phys. J. C 78, 701 (2018), arXiv: 1806.00863.
- 10. G. Aad et al. (ATLAS Collab.), JHEP 1509, 049 (2015), arXiv: 1503.03709.
- 11. R. Aaij et al. (LHCb Collab.), JHEP 1511, 190 (2015), arXiv: 1509.07645.
- 12. https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/ public-results/publications/SMP/VV.html
- 13. https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/ public-results/publications/SMP/AQGC.html
- 14. A. M. Sirunyan et al. (CMS Collab.), JHEP 2004, 188 (2020), arXiv: 1910.12127.
- 15. T. Aaltonen et al. (CDF Collab.), Phys. Rev. Lett. 112, 221801 (2014), arXiv: 1404.3392; Phys. Rev. D 87, 111101 (2013), arXiv: 1303.6142; V. M. Abazov et al. (D0 Collab.), Phys. Rev. Lett. 107, 121802 (2011), arXiv: 1106.5436.
- 16. M. Tanabashi et al., Phys. Rev. D 98, 030001 (2018).
- 17. M. Aaboud et al. (ATLAS and CMS Collab.), JHEP 1905, 088 (2019), arXiv: 1902.07158; V. Khachatryan et al. (CMS Collab.) JHEP 1702, 028 (2017), arXiv: 1610.03545.

ЯЛЕРНАЯ ФИЗИКА ТОМ 84 Nº 1 2021

ELECTROWEAK PHYSIC WITH THE CMS EXPERIMENT AT THE LHC

V. Shalaev^{1),2)}, S. Shmatov^{1),2)}

¹⁾Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia ²⁾Dubna State University, Dubna, Russia

The review summarizes electroweak physics results from the CMS experiment at the LHC.