

ФИЗИКА СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS НА LHC

В. В. Шалаев^{1,*}, *С. В. Шматов*^{1,2}

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Представлены избранные результаты исследований процессов Стандартной модели в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере.

The paper contains the review of the most essential results of Standard Model physics studies based on data recorded by the CMS detector during the LHC Run-1 and Run-2.

PACS: 04.50.Gh; 14.70.Pw; 14.80.Rt; 14.80.Sv; 14.80.Tt; 14.65.Jk;
14.70.Kv; 14.60.St

Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC) в ЦЕРН по праву получил название машина открытий. Рекордные энергии столкновения пучков протонов LHC позволяют проводить изучение механизмов рождения элементарных частиц и поиск сигналов физики за рамками общепринятой теории взаимодействия частиц — Стандартной модели (СМ) — в широких, ранее недоступных на других ускорителях, диапазонах переданных 4-импульсов. Со времени его запуска в 2009 г. были открыты бозон Хиггса, ряд новых субатомных частиц и экзотических адронов, таких как тетракварки и пентакварки, выполнена серия экспериментов по поиску суперсимметрии, расширенного калибровочного сектора, сценариев с пониженным масштабом гравитации, частиц-кандидатов на роль темной материи и многих других сигналов новой физики. Прецизионные измерения характеристик процессов СМ являются важным тестом теорий сильных и электрослабых взаимодействий в новой области энергий и одним из ключевых базисов поисковых экспериментов. В этом ряду важную роль играют редкие процессы, предсказываемые СМ, но ранее не наблюдавшиеся. В данной работе представлены избранные результаты по исследованию процессов СМ, полученные в эксперименте «Компактный мюонный соленоид» (Compact Muon Solenoid, CMS). Большой объем данных, набранный в экспериментах на LHC при энергии $\sqrt{s} = 7, 8$ и 13 ТэВ, позволил провести подобные измерения с беспрецедентной точностью. В течение первого (Run-1) и второго

* E-mail: Vladislav.shalaev@cern.ch

(Run-2) этапов работы LHC накопленная CMS статистика столкновений протонных пучков составила около $L_{\text{int}} = 27$ и 140 фб^{-1} соответственно.

Изучение процессов электрослабого (ЭС) взаимодействия представляет собой один из наиболее важных тестов СМ. Электрослабая теория довольно точно предсказывает свойства переносчиков взаимодействия — калибровочных бозонов W , Z и γ . В частности, их массы и константы связи с фермионами и друг с другом могут быть выражены через константы связи g калибровочной группы $SU(2)_L$ и g' калибровочной группы $U(1)_Y$, а также вакуумное среднее хиггсовского поля. Таким образом, измерение наблюдаемых характеристик ЭС-процессов предоставляет информацию о фундаментальных параметрах теории. Кроме того, гипотетические явления за рамками СМ могут вносить вклад в реакции с участием калибровочных бозонов, что обуславливает необходимость увеличения точности как измерений, так и теоретических расчетов процессов с участием калибровочных бозонов.

Результаты измерения дифференциальных сечений рождения Z -бозона с их последующим распадом на пару заряженных лептонов ($Z \rightarrow e\bar{e}$ и $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$) изложены в работах [1–4]. Однако отдельный интерес представляет измерения в канале $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$, называемом невидимым, так как нейтрино не могут быть зарегистрированы детектором напрямую. Вероятность распада Z -бозона (брэнчинг) в нейтрино примерно в шесть раз больше, чем в заряженные лептоны, что позволяет снизить статистическую неопределенность измерения, кроме того, механизм регистрации нейтрино посредством потерянного поперечного импульса p_T^{miss} делает данный канал особенно чувствительным к событиям, в которых Z -бозон имеет большой поперечный импульс p_T^Z . Результаты измерения спектра нейтрино, а также полного сечения рождения Z -бозона ($Z \rightarrow l^+l^- + Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$) в зависимости от поперечного импульса представлены на рис. 1 [5]. Результаты измерений не противоречат предсказаниям теории и на данный момент являются самым точным измерением p_T -спектра Z -бозона.

Точные значения сечений рождения калибровочных бозонов и их зависимость от кинематических переменных также могут быть использованы для измерения значения бегущей константы связи КХД $\alpha_S(m_Z)$. Путем сравнения измеренных в эксперименте дифференциальных сечений W^{\pm} - и Z -бозона с вычислениями, выполненными для различных значений $\alpha_S(m_Z)$, было получено значение $\alpha_S(m_Z) = 0,1175^{+0,0025}_{-0,0028}$ [6], что в пределах ошибки согласуется со средним мировым значением $\alpha_S(m_Z) = 0,1181 \pm 0,0011$. На рис. 2, а показаны результаты извлечения $\alpha_S(m_Z)$ с использованием различных функций распределения партонов (Parton Distribution Functions, PDF) для 12 сечений, на рис. 2, б представлен комбинированный результат этих вычислений.

Совместное рождение нескольких калибровочных бозонов открывает прямой путь к измерению константы их самодействия и исследованию неабелевой структуры ЭС-взаимодействий. Кроме того, возникновение

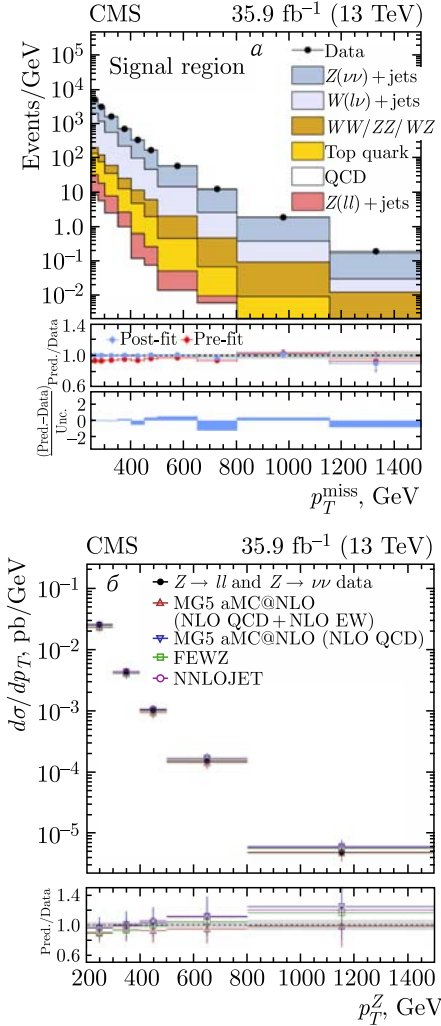


Рис. 1. а) p_T^{miss} -спектр событий с парой $\nu\bar{\nu}$ от распада Z^0 ; б) полное сечение рассеяния Z -бозона, измеренное в комбинированном ($Z \rightarrow l^+l^- + Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$) канале [5], в сравнении с теоретическими предсказаниями

аномалий во взаимодействиях может свидетельствовать о присутствии новой физики. Сечения таких процессов крайне малы — для обнаружения процесса типа VVV ($V = W, Z$) в комбинированном канале ($WWW + WZZ + WWZ + ZZZ$) со статистической значимостью 5,7 стандартных отклонений для эксперимента CMS понадобилась вся

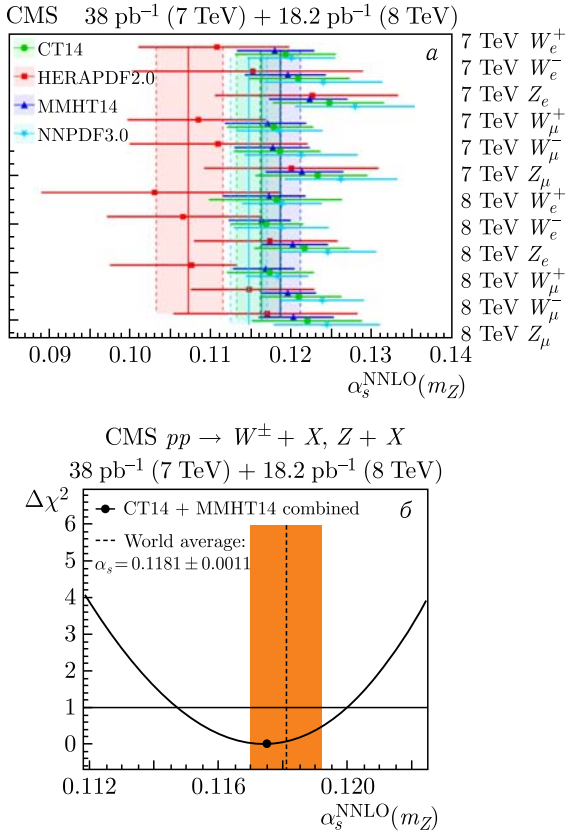


Рис. 2. а) Значения $\alpha_S(m_Z)$, измеренные для каждого из 12 сечений W - и Z -бозона с использованием четырех наборов PDF; б) комбинированное значение параметра $\alpha_S(m_Z)$, полученное в эксперименте CMS на основе сечений рождения W - и Z -бозона при энергии $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ в сравнении с мировым средним значением [6]

статистика Run-2 [7]. Отметим, что в эксперименте ATLAS объявлено о наблюдении такого процесса на половине статистики Run-2 (80 фб⁻¹), но с меньшей статистической значимостью $4,1\sigma$ [8]. Измеренные сечения процессов ассоциированного рождения трех калибровочных бозонов согласуются с ожидаемыми и свидетельствуют об отсутствии аномальных вкладов трех- и четырехбозонных вершин (TGC и QGC). Поиск вклада от TGC и QGC также осуществлялся в процессе рассеяния векторных бозонов (VBS) и их полулептонном распаде $WV \rightarrow lvqq$. В эксперименте CMS на полной статистике Run-2 удалось впервые наблюдать этот процесс со статистической значимостью $4,4\sigma$. Признаков аномального пове-

дения констант связи не обнаружено — комбинированная интенсивность сигнала от КХД и ЭС-взаимодействий $\mu = \sigma^{\text{obs}}/\sigma^{\text{SM}} = 0,98^{+0,20}_{-0,17}$ находится в согласии с предсказаниями СМ в пределах 68% доверительного интервала (CL) (рис. 3) [9].

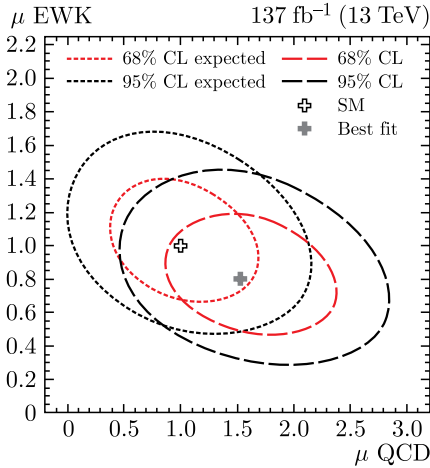


Рис. 3. Интенсивность сигнала КХД и ЭС-взаимодействий μ для процесса $WV \rightarrow lvqq$. Обозначены доверительные интервалы 68 и 95% для экспериментальных данных и предсказаний СМ [9]

Одним из довольно редких интересных эффектов, отчетливо проявившимся при возрастании энергии взаимодействия протонных пучков, является процесс мультипартонного взаимодействия (Multiple Parton Interaction, MPI). Эти процессы могут вносить существенный вклад в фон при поисках новой физики, поэтому необходима тонкая настройка монте-карло-моделей MPI, так как сечения мультипартонного взаимодействия не могут быть рассчитаны в рамках пертурбативной КХД. Изучению процессов двойного рассеяния партонов (Double Parton Scattering, DPS) в каналах рождения 4 адронных струй (4 jets) и ассоциированного рождения Z -бозона со струями ($Z + \text{jets}$) в эксперименте CMS при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ посвящены работы [10] и [11]. На рис. 4, а представлены результаты измерений параметра корреляции независимых партон-партонных взаимодействий в DPS-процессе σ_{eff} для различных значений \sqrt{s} . В частности, для измерения при 13 ТэВ использовались несколько теоретических моделей. Полученные значения σ_{eff} сопоставимы с измеренными при меньших значениях энергии взаимодействия, однако имеет место расхождение с предыдущим измерением этого параметра в эксперименте CMS при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ. Пример сравнения полученных кинематических распределений продуктов DPS-процесса в канале $Z + \text{jets}$ с предсказаниями различных теоретических моделей представлен на рис. 4, б [11]. Для теоретического описания данных были использованы различные модели MPI, параметры которых были настроены на ранее полученных результатах [12, 13]. Исследование полного набора кин-

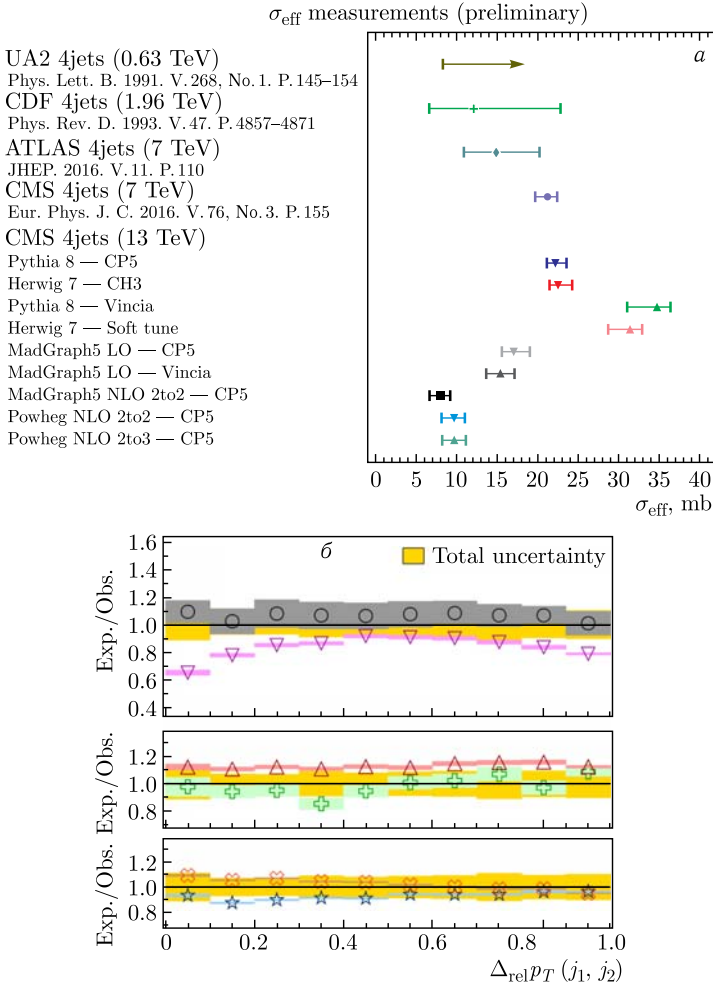


Рис. 4. *a*) Значения параметра σ_{eff} , измеренного в канале 4 jets при различных \sqrt{s} . Результаты при 13 ТэВ представлены для шести теоретических моделей, используемых при извлечении [10]. *б*) Сравнение экспериментальной и теоретической зависимости сечения ассоциированного рождения Z и двух струй от величины отношения векторной суммы поперечных импульсов этих струй к сумме их абсолютных значений $\Delta_{\text{rel}} p_T(j_1, j_2)$ [11]

матических характеристик показало их чрезвычайную чувствительность к виду используемой модели, что требует дальнейшей настройки параметров моделей MPI как на основе измерений процессов DPS, так

и с учетом всей совокупности результатов исследования непертурбативной КХД на ЛHC.

В заключение можно отметить, что на сегодня результаты исследований КХД и ЭС-процессов в экспериментах на ЛHC полностью согласуются с предсказаниями СМ. В результате комплексного анализа экспериментальных данных ЛHC Run-1 и Run-2 удалось улучшить точность измерения важных параметров СМ, а также обнаружить процессы ассоциированного рождения трех бозонов и прочие редкие процессы, предсказанные теоретически. Планируемое в период Run-3 увеличение интегральной светимости позволит уменьшить статистическую неопределенность измерений и наложить более строгие ограничения на сценарии новой физики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90212.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *CMS Collab.* Transverse-Momentum and Pseudorapidity Distributions of Charged Hadrons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105. P. 022002; arXiv:1005.3299.
2. *CMS Collab.* Measurement of the Z Boson Differential Cross Section in Transverse Momentum and Rapidity in Proton-Proton Collisions at 8 TeV // *Phys. Rev. Lett.* B. 2015. V. 749. P. 187; arXiv:1504.03511.
3. *CMS Collab.* Measurements of Differential and Double-Differential Drell-Yan Cross Sections in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // *Eur. Phys. J. C.* 2015. V. 75. P. 147; arXiv:1412.1115.
4. *CMS Collab.* Measurements of Differential Z Boson Production Cross Sections in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *JHEP.* 2019. V. 12. P. 061; arXiv:1909.04133.
5. *CMS Collab.* Measurement of the Z Boson Differential Production Cross Section Using Its Invisible Decay Mode ($Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$) in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *JHEP.* 2021. V. 05. P. 205; arXiv:2012.09254.
6. *CMS Collab.* Determination of the Strong Coupling Constant $\alpha_S(m_Z)$ from Measurements of Inclusive W^\pm and Z Boson Production Cross Sections in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // *JHEP.* 2019. V. 018. P. 45; arXiv:1912.04387.
7. *CMS Collab.* Observation of the Production of Three Massive Gauge Bosons at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2020. V. 125. P. 151802; arXiv:2006.11191.
8. *ATLAS Collab.* Evidence for the Production of Three Massive Vector Bosons with the ATLAS Detector // *Phys. Lett. B.* 2019. V. 798. P. 134913; arXiv:1903.10415.
9. *CMS Collab.* Search for Vector Boson Scattering at the LHC Run 2 with CMS Data in the Semi-Leptonic $lvqq$ Final State. CMS-PAS-SMP-20-013. 2020. <https://cds.cern.ch/record/2776799>.
10. *CMS Collab.* Measurement of Double-Parton Scattering in Inclusive Production of Four Jets with Low Transverse Momentum in Proton-Proton

Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP (submitted); CMS-SMP-20-007. 2021. arXiv:2109.13822.

11. *CMS Collab.* Study of Z Boson Plus Jets Events Using Variables Sensitive to Double-Parton Scattering in pp Collisions at 13 TeV // JHEP. 2021. V. 2110. P. 176; arXiv:2105.14511.
12. *CMS Collab.* Extraction and Validation of a New Set of CMS PYTHIA8 Tunes from Underlying-Event Measurements // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. P. 4; arXiv:1903.12179.
13. *CMS Collab.* Event Generator Tunes Obtained from Underlying Event and Multiparton Scattering Measurements // Eur. Phys. J. C. 2016. V. 76. P. 155; arXiv:1512.00815.