

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS НА LHC

*С. В. Шматов**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

В работе представлены результаты исследований процессов Стандартной модели в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере.

The paper presents a short overview of the most essential results of the Standard Model physics studies based on the data recorded by the CMS detector during the LHC Run1 and Run2.

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

В рамках изучения различных процессов Стандартной модели (СМ) на Большом адронном коллайдере (LHC) актуальна проверка этой теории взаимодействий элементарных частиц в новой области энергий. Поэтому одной из первоочередных задач экспериментов на LHC является своего рода «переоткрытие» (rediscovery) СМ — тщательное исследование всех известных и изученных до эры LHC частиц и процессов физики элементарных частиц, измерение сечений, масс и т. д. Кроме того, в начале каждого этапа работы LHC важно было убедиться в том, что все детекторные системы, методы отбора, реконструкции и анализа событий работают в штатном режиме и мы не наблюдаем никаких физических артефактов.

В работе представлены результаты исследований процессов СМ в эксперименте «Компактный мюонный соленоид» (CMS), полученные при столкновении пучков протонов во время первого и второго этапов работы LHC (Run1 и Run2) при $\sqrt{s} = 7, 8$ (Run1) и 13 ТэВ (Run2) соответственно.

Сразу после запуска LHC в 2009 г. было начато изучение множественного рождения заряженных адронов при энергии $\sqrt{s} = 0,9, 2, 36$ и 7 ТэВ. Было показано значительное расхождение полученных распределений множественности и энергетической зависимости псевдобыстротной плотности множественности dN_{ch}/η от предсказаний теоретических моделей [1]. Это потребовало

*E-mail: shmatov@cern.ch

настройки параметров генераторов событий Монте-Карло для дальнейшей интерпретации данных ЛХС, и, в частности, удалось привести в соответствие их предсказания и результаты последующих исследований, проведенных во время Run1 и Run2 (рис. 1, *a*) [2].

Первые измерения сечений инклюзивного рождения струй при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ показали хорошее согласие данных и предсказаний СМ в первом порядке теории возмущений (NLO) в области поперечного импульса струй

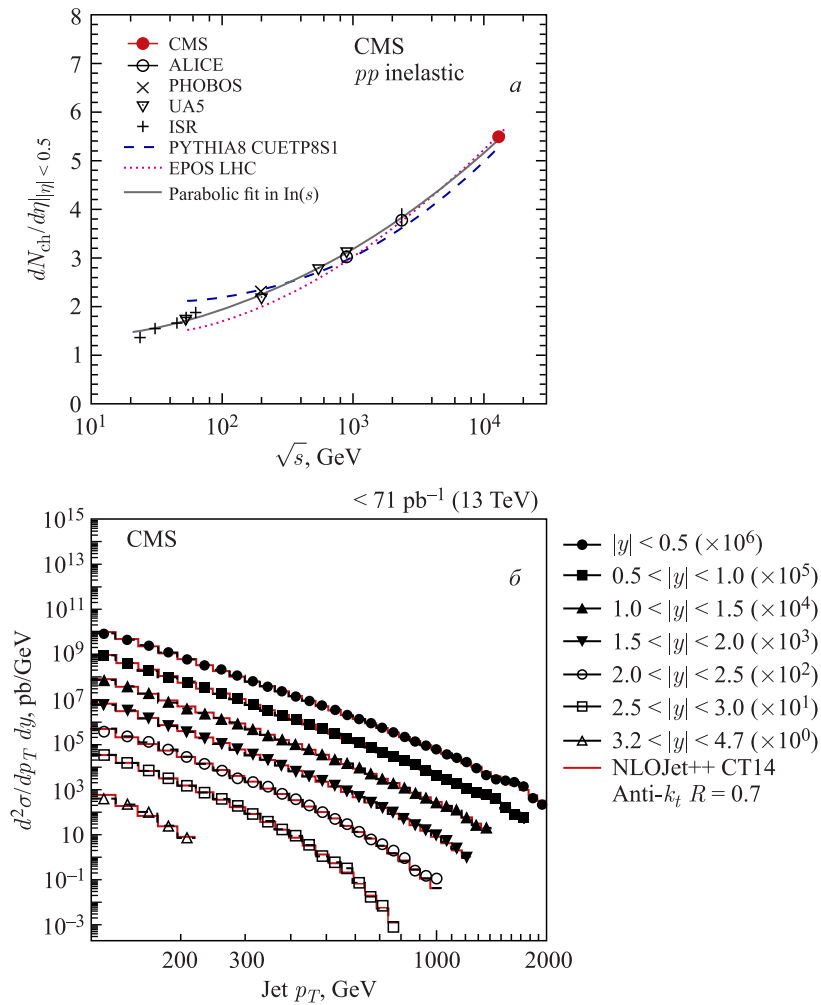


Рис. 1. *a*) Зависимость плотности множественности заряженных адронов от \sqrt{s} [2].
б) Дважды дифференциальные сечения рождения струй [3]

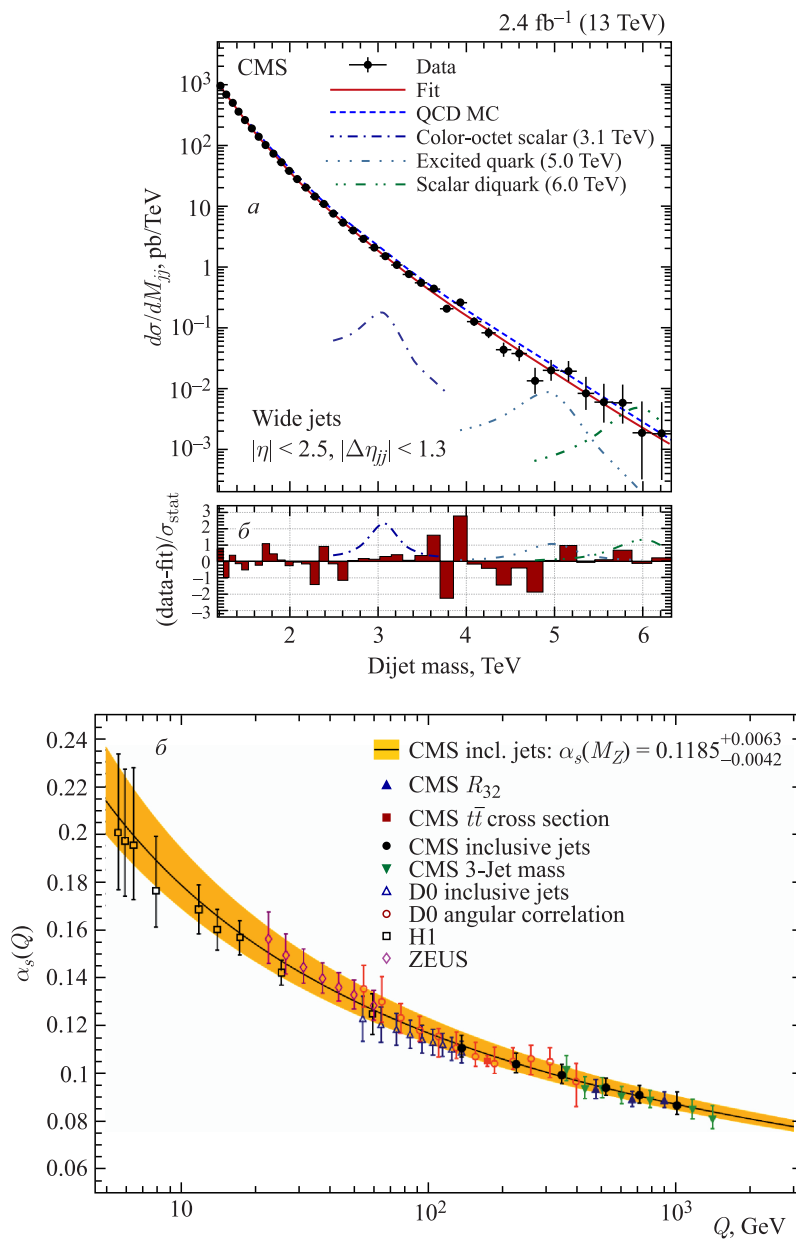


Рис. 2. а) Зависимость сечения рождения пары струй от их инвариантной массы [4]. б) Значение бегущей константы связи КХД $\alpha_s(M_Z)$ [6]

вплоть до 2,0 ТэВ/с и быстроты $|y| \leq 2,5$. Впоследствии это было подтверждено при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ для p_T до 2,5 ТэВ/с в шести интервалах быстроты $|y| \leq 3,0$ и на первых данных Run2 (рис. 1, б) [3]. Анализ парного рождения струй — измерение их дифференциального сечения $d\sigma/dM_{jj}$ в области инвариантных масс до 6,1 ТэВ/с² (рис. 2, а) [4], угловых распределений струй и их азимутальных декорреляций [5] — также не выявил отклонений от теоретических предсказаний, но установил границы параметров физических сценариев за рамками СМ.

Комбинированный анализ инклюзивного рождения струй, парного образования t -кварка, сечений рождения двух и трех струй позволил извлечь значение бегущей константы связи КХД в NLO (рис. 2, б) [6]. Полученное значение $\alpha_s^{\text{NLO}}(M_Z) = 0,1185 \pm 0,0019$ (эксп.) $^{+0,0060}_{-0,0037}$ (теор.) с высокой точностью совпадает с мировым значением $\alpha_s(M_Z) = 0,1181 \pm 0,0013$. Кроме того, эти данные были использованы для проверки и уточнения различных функций распределения кварков и глюонов. Важно отметить, что по данным рождения $t\bar{t}$ впервые на адронных коллайдерах было получено при измерении во втором порядке теории возмущений (NNLO) значение $\alpha_s^{\text{NNLO}}(M_Z) = 0,1151^{+0,0028}_{-0,0027}$ [7].

Одним из первых шагов по проверке предсказаний электрослабой теории (EWK), осуществляемых в начале каждого этапа работы LHC, является изучение полных сечений рождения калибровочных бозонов W и Z (рис. 3)

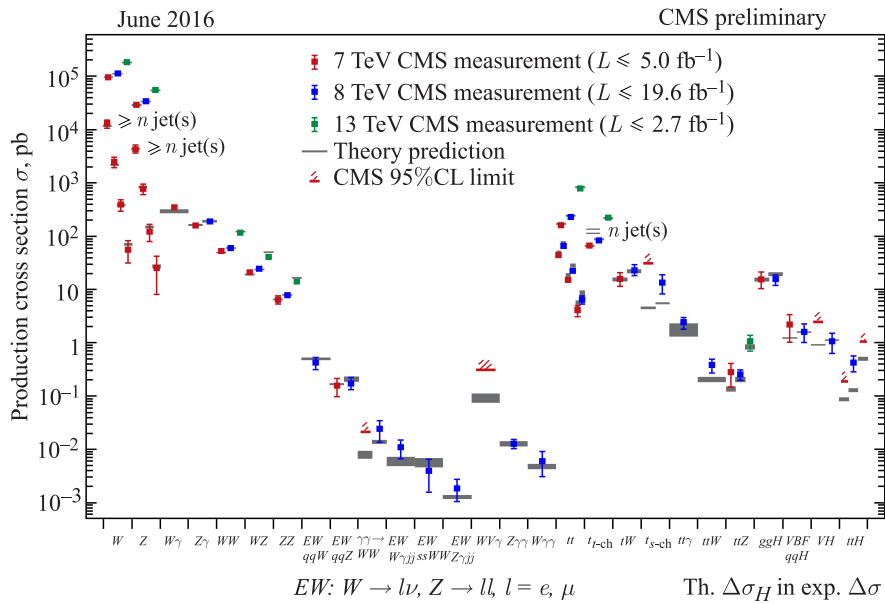


Рис. 3. Сечения процессов EWK при $\sqrt{s} = 7, 8$ и 13 ТэВ [8]

и вероятностей их распада по различным каналам. Измеренные сечения, их энергетическая зависимость (отношения сечений рождения одиночных бозонов при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ были измерены с точностью до 2%), величины брэнчингов полностью согласуются с NNLO-вычислениями. По мере увеличения набранной статистики проводится измерение более редких процессов — совместного рождения пар калибровочных бозонов (см. рис. 3), а также $W/Z/\gamma$ и струй. Полученные результаты также показывают хорошее согласие экспериментальных данных и в СМ. Измерения сечений парного рождения калибровочных бозонов открывают путь к изучению аномальных трех- и четырехбозонных вершин (aTGC и aQGC). Это является важным тестом теории электрослабых взаимодействий и «пробником» физики за пределами СМ: в рамках эффективной теории поля (EFT) СМ описывается лагранжианом, в котором присутствуют члены высших размерностей, дающие дополнительный (нестандартный) вклад и ответственные за возникновение аномалий во взаимодействиях. К настоящему времени никаких признаков аномального поведения констант связи не обнаружено.

По сравнению с экспериментами на тэватроне сечение рождения t -кварка на LHC возрастает в десятки и даже сотни раз (рис. 4) [9]. Значения измеренных полных сечений, как и дифференциальных сечений по массе, быстрой, переданному моменту, находятся в хорошем согласии со значениями СМ в NNLO при $m_t = 172,5$ ГэВ/ c^2 . Данные по одиночному рождению t -кварка позволили оценить матричный элемент $|V_{tb}|$, значение которого во всех каналах и при всех исследованных энергиях, как и ожидалось, оказалось порядка единицы [9]. Несмотря на крайне небольшие сечения на LHC, возможно наблюдение процессов ассоциированного рождения пары топ-кварков и калибровочных бозонов (W или Z) [10] или пары $t\bar{t}$ и струй [11]. Результаты измерений комбинированного сечения для калибровочных бозонов V (W и Z) $\sigma_{t\bar{t}V}^{8\text{TeV}} = (380_{-90}^{+100}$ (стат.) $_{-70}^{+80}$ (сист.)) фб в пределах погрешностей согласуются с вычислениями в СМ. Особо стоит отметить результаты измерений массы t -кварка $m_t = (172,44 \pm 0,11$ (стат.) $\pm 0,47$ (сист.)) ГэВ/ c^2 [12], которые были выполнены с уникальной точностью ($\sim 0,28\%$), что превышает точность измерений на ускорителе тэватрон.

Кроме измерения ранее изучавшихся процессов при более низких энергиях в эксперименте CMS впервые обнаружены и изучены редкие явления СМ, которые были теоретически предсказаны, но до сих пор не наблюдались. Одним из них является процесс совместного рождения t и W [13], сечение которого $\sigma_{tW}^{8\text{TeV}} = (23,4 \pm 5,4)$ пб также оказалось в полном соответствии с теорией.

Другой ранее не наблюдавшийся процесс — распад B -мезонов на два мюона — является идеальным методом непрямого наблюдения физики за пределами СМ. Распады двух типов B -мезонов (B_0 и B_S^0) на пары мюонов сильно подавлены в СМ, хотя некоторые расширения СМ предсказывают

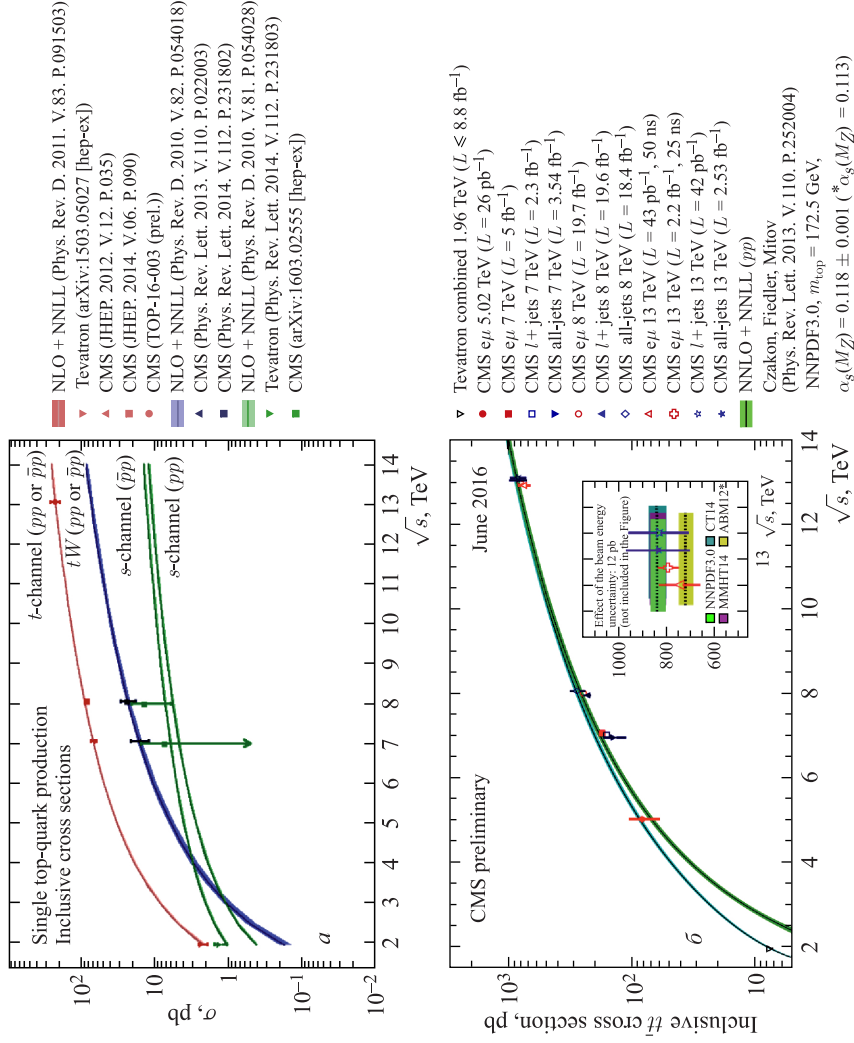


Рис. 4. Зависимость от \sqrt{s} сечения одиночного (а) и парного (б) рождения t -кварков [9]

либо значительное превышение, либо более сильное подавление этих распадов. Более 25 лет во многих экспериментах на различных типах коллайдеров ведутся поиски этих редких распадов. Впервые явное наблюдение распада $B_S^0 \rightarrow \mu\mu$ было осуществлено в эксперименте LHCb в ноябре 2012 г. со статистической значимостью $3,2\sigma$ [14]. В CMS для этого исследования использовались экспериментальные данные со статистикой $\mathcal{L}_{\text{int}} = 5$ и 20 фб^{-1} соответственно, которые позволили наблюдать распад $\mathcal{B}(B_S^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$ со статистической значимостью $4,3\sigma$ [15]. Также были проведены поиски распада $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$, которые привели к установлению верхнего предела на вероятность этого распада $1,1 \cdot 10^{-9}$ при 95%-м уровне статистической достоверности, что также согласуется со Стандартной моделью. Объединение данных экспериментов CMS и LHCb [16] позволило улучшить точность измерений: $\mathcal{B}(B_S^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (2,8_{-0,6}^{+0,7}) \cdot 10^{-9}$ и $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3,6_{-1,4}^{+1,6}) \cdot 10^{-10}$. Таким образом, вся совокупность экспериментальных данных практически не оставляет шанса на наблюдение новой физики при изучении распадов B_S^0 (рис. 5). Распад же $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ демонстрирует легкое отклонение от предсказания СМ на уровне статистической значимости 2σ , и окончательную точку в этом вопросе можно будет поставить при значительном увеличении статистики.

Еще одним, неожиданным, но не противоречащим СМ, явлением стало открытие в pp -столкновениях дальнедействующих угловых корреляций, т. е. корреляций частиц, разлетающихся под большими углами друг к другу, но лежащих практически в одной поперечной плоскости [17]. Это приводит к образованию локального протяженного максимума — «хребта» (ridge) —

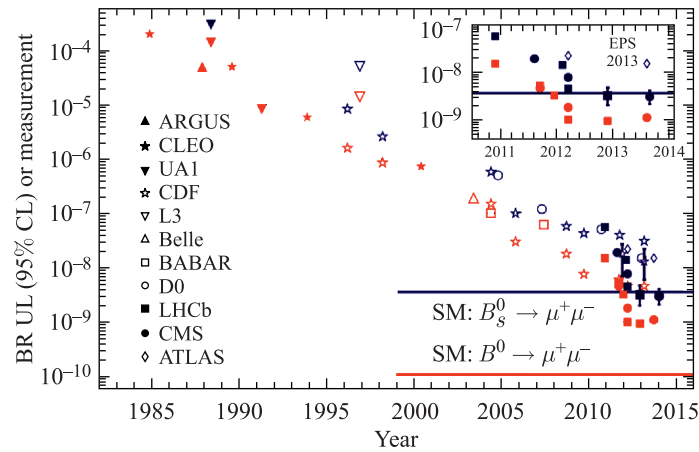


Рис. 5. Вероятность распада $B^0/B_S^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$, измеренная в различных экспериментах [8]

на двумерном распределении корреляционной функции при разнице азимутальных углов вылетающих частиц $\Delta\phi \sim 0$ даже для больших разниц псевдобыстрот $\Delta\eta$. До этого такое поведение при больших значениях $\Delta\eta$ наблюдалось только в столкновениях тяжелых ядер на RHIC, что было подтверждено и на CMS не только во взаимодействии ядер свинца при $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ, но и в p Pb-взаимодействии при $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ.

Итогом первого этапа работы ЛHC при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ стал очередной триумф Стандартной модели: был открыт долгожданный бозон Хиггса, а все экспериментальные результаты абсолютно не противоречили теоретическим предсказаниям. Первые измерения CMS процессов сильных и электрослабых взаимодействий при энергии сталкивающихся пучков 13 ТэВ в с. ц. м. также не показали каких-либо отклонений от СМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *CMS Collab.* Charged Particle Multiplicities in pp Interactions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.36,$ and 7 TeV // *JHEP.* 2011. V. 01. P. 079; arXiv:1011.5531;
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.* Pseudorapidity Distribution of Charged Hadrons in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *Phys. Lett. B.* 2015. V. 751. P. 143; arXiv:1507.05915.
3. *CMS Collab.* Measurement of the Double-Differential Inclusive Jet Cross Section in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *Eur. Phys. J. C.* 2016. V. 76. P. 451; arXiv:1605.04436.
4. *CMS Collab.* Search for Narrow Resonances Decaying to Dijets in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 071801; arXiv:1512.01224.
5. *CMS Collab.* Measurement of Dijet Azimuthal Decorrelations in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // *Eur. Phys. J. C.* 2016. V. 76. P. 536; arXiv:1602.04384.
6. *CMS Collab.* Constraints on Parton Distribution Functions and Extraction of the Strong Coupling Constant from the Inclusive Jet Cross Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Eur. Phys. J. C.* 2015. V. 75. P. 288; arXiv:1410.6765.
7. *CMS Collab.* Determination of the Top-Quark Pole Mass and Strong Coupling Constant from the $t\bar{t}$ Production Cross Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Phys. Lett. B.* 2014. V. 728. P. 496.
8. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsCombined>
9. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsTOPSummaryFigures>
10. *CMS Collab.* Measurement of Top Quark–Antiquark Pair Production in Association with a W or Z Boson in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // *Eur. Phys. J. C.* 2014. V. 74. P. 3060; arXiv:1406.7830.

11. *CMS Collab.* Measurement of the Cross Section Ratio $\sigma_{t\bar{t}b\bar{b}}/\sigma_{t\bar{t}jj}$ in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // *Phys. Lett. B.* 2015. V. 746. P. 132; arXiv:1411.5621.
12. *CMS Collab.* Measurement of the Top Quark Mass Using Proton–Proton Data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // *Phys. Rev. D.* 2016. V. 93. P. 072004; arXiv:1509.04044.
13. *CMS Collab.* Observation of the Associated Production of a Single Top Quark and a W Boson in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 112. P. 231802; arXiv:1401.2942;
CMS Collab. Evidence for Associated Production of a Single Top Quark and W Boson in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110. P. 022003; arXiv:1209.3489.
14. *LHC-B Collab.* First Evidence for the Decay $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110. P. 021801; arXiv:1211.2674.
15. *CMS Collab.* Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ Branching Fraction and Search for $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ with the CMS Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P. 101804; arXiv:1307.5025.
16. *CMS and LHC-B Collabs.* Observation of the Rare $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ Decay from the Combined Analysis of CMS and LHCb Data // *Nature.* 2015. V. 522. P. 68; arXiv:1411.4413.
17. *CMS Collab.* Observation of Long-Range Near-Side Angular Correlations in Proton–Proton Collisions at the LHC // *JHEP.* 2010. V. 091. P. 1009; arXiv:1009.4122;
CMS Collab. Measurement of Long-Range Near-Side Two-Particle Angular Correlations in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 172302; arXiv:1510.03068.