

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS НА LHC ПО ПОИСКУ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2016 г. С. В. Шматов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Поступила в редакцию 20.02.2015 г.; после доработки 21.08.2015 г.

Представлен обзор основных результатов эксперимента CMS по поиску сигналов от дополнительных пространственных измерений, полученных за время первого сеанса Большого адронного коллайдера (LHC) при энергии сталкивающихся пучков протонов $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ в с.ц.м.

DOI: 10.7868/S0044002716010190

ВВЕДЕНИЕ

Программа физических исследований многоцелевого эксперимента “Компактный мюонный соленоид” (CMS) [1] по обнаружению “новой” физики за рамками стандартной модели представляет собой широкомасштабный поисковый эксперимент, направленный на обнаружение ожидаемых отклонений от предсказаний стандартной модели (СМ) [2]. CMS ведет поиск сигналов от новых физических объектов и явлений, предсказываемых суперсимметричными моделями, моделями расширенного калибровочного сектора, моделями техницвета, а также сценариями многомерных теорий, предлагаемых для решения проблемы “иерархий” (тонкой подстройки СМ). Разнообразие предсказываемых этими моделями новых частиц и явлений требует использования широкого спектра экспериментальных наблюдаемых в различных каналах (см., например, [3]).

В настоящей работе представлен обзор основных результатов эксперимента CMS по поиску сигналов от дополнительных пространственных измерений. Анализ выполнен на основании данных, полученных за время первого сеанса LHC в 2011–2012 гг. при энергии сталкивающихся пучков протонов $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ в с.ц.м. Статистика проанализированных данных составила 5.1 фбн^{-1} за 2011 г. и 20.1 фбн^{-1} за 2012 г.

СЦЕНАРИЙ RS1

В сценарии многомерной гравитации Рэндалл–Сандрум (RS1) [4] предсказывается существование массивных (с массой порядка нескольких ТэВ)

калуца–клейновских возбуждений (КК–моды) гравитона G_{KK} (RS–гравитона), которые могут распадаться на пары лептонов, струй, фотонов и даже калибровочных бозонов СМ.

Таким образом, одним из отличительных экспериментальных сигналов рождения G_{KK} может быть пара перечисленных частиц СМ с большими поперечными импульсами, исходящими из одной и той же точки взаимодействия. На рис. 1а представлено распределение по инвариантной массе пар фотонов, измеренных экспериментом CMS при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ для интегральной светимости $\mathcal{L}_{\text{int}} = 2.2 \text{ фбн}^{-1}$ [5], и ожидаемый вклад процессов СМ. Также приведены аналогичные распределения для спектра фотонов, образующихся в результате распада RS–гравитона с массой 1.75 ТэВ/ c^2 , и нерезонансный вклад от КК–гравитонов модели ADD (см. ниже) [6]. Измеренные значения находятся в хорошем согласии с предсказаниями СМ. Исследования парного рождения фотонов при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ привели к ограничениям на массу КК–гравитона с уровнем статистической достоверности 95%, которые составили 1450–2780 ГэВ/ c^2 в зависимости от величины константы связи RS–гравитона с материей $c = 0.01–0.1$ [7]. Параметр модели c определяется как отношение k/M_{Pl} , где k – кривизна пространства анти-де Ситтера, а M_{Pl} – четырехмерный планковский масштаб.

Комбинированный анализ рождения мюонных и электронных пар при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ позволил установить нижние пределы на массы предсказываемых резонансов [8]. На рис. 1б приведен график зависимости сечений рождения новых резонансов с учетом вероятности их распада на пару лептонов от инвариантной массы лептонов. Для уменьшения

*E-mail: Sergei.Shmatov@cern.ch

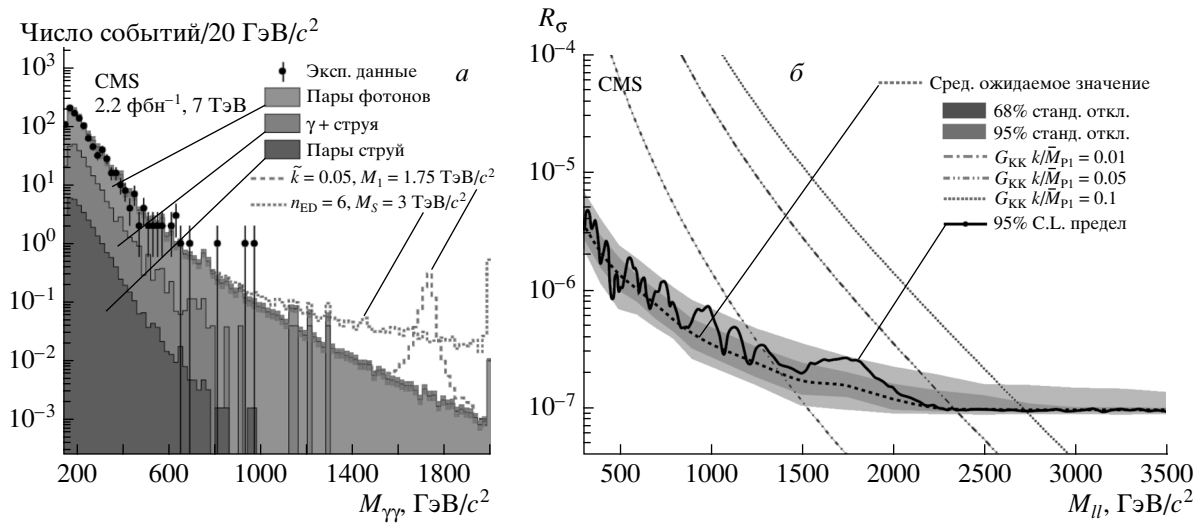


Рис. 1. *а* — Распределение событий с парами фотонов, зарегистрированных установкой CMS, по инвариантной массе (точки с ошибками) при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ [5]. Приведено сравнение с процессами СМ и моделями дополнительных измерений RS1 и ADD. *б* — Верхний предел (95% C.L.) на сечение рождения пар лептонов, нормированное на сечение рождения Z -бозона, при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ [8]. Приведены предсказываемые сечения рождения возбужденного состояния RS-гравитона в канале распада на два лептона для различных значений отношения k/M_{Pl} .

влияния систематических эффектов сечение нормировано на сечение рождения Z^0 -бозона: $R_\sigma = \sigma(pp \rightarrow G_{KK} \rightarrow ll)/\sigma(pp \rightarrow Z \rightarrow ll)$. Проанализированы предсказания модели многомерной гравитации RS1 для значений параметра s в диапазоне значений от 0.01 до 0.10. На этом же рисунке представлен полученный из экспериментальных данных верхний предел на сечение рождения пар лептонов (сплошная кривая), соответствующий 95%-ной статистической достоверности (C.L.). Кроме того, приведен средний ожидаемый предел в предположении отсутствия сигнала “новой физики” (штриховая кривая) с 68%- и 95%-ным стандартным отклонением ожидаемого предела (затемненные области вокруг штриховой кривой). С 95% C.L. были исключены RS-гравитоны с массой менее 1270–2730 ГэВ/ c^2 в зависимости от величины отношения радиуса кривизны многомерного пространства и значения фундаментального масштаба Планка.

Данные по рождению пары струй с общей статистикой, соответствующей 19.6 фбн $^{-1}$, позволили получить верхний предел (95% C.L.) на сечение рождения двухструйных резонансов различных типов в диапазоне масс двухструйных событий до 5.5 ТэВ/ c^2 [9]. Сравнением полученного предела с предсказаниями различных теорий за рамками СМ были установлены новые ограничения на массы новых физических объектов. В частности, масса RS-гравитона G_{KK} была ограничена 1.6 ТэВ/ c^2 . Этот результат находится в хорошем согласии с

данными по поиску распада гравитона на два тяжелых кварка $b\bar{b}$ [10].

Помимо распада на два фермиона, другой интересной для экспериментального поиска модой распада RS-гравитона является распад на два калибровочных бозона WW и ZZ . Причем в некоторых расширениях сценария RS1 (например, в модели “толстой” браны), в которых фермионы СМ не привязаны к одной трехмерной бране, а могут быть локализованы во всем многомерном пространстве, рождение многомерного гравитона (G_{bulk}) в процессах $q\bar{q}$ -аннигиляции с последующим распадом на легкие фермионы сильно подавлено [11]. В этом случае доминирует рождение G_{bulk} в процессах слияния глюонов и распады на пару калибровочных бозонов. Так, в канале распада $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow 4jets$ эксперимент CMS исключил существование RS-гравитона с массой менее 1.2 ТэВ/ c^2 [12], в то время как в полулептонном распаде $G_{bulk} \rightarrow WW(ZZ) \rightarrow 2jets + 2l$ получены верхние границы на сечения рождения гравитонов, которые составили от 700 до 10 фбн для массового интервала 600–2500 ГэВ/ c^2 [13].

СЦЕНАРИЙ ADD

Характерной чертой сценария Arkani-Hamed–Dimopoulos–Dvali (ADD) [6] является предсказание легких КК-гравитонов, которые будут давать вклады во все процессы взаимодействий СМ и могут быть наблюдаемы на коллайдерах как в процессах непосредственного (реального) рождения

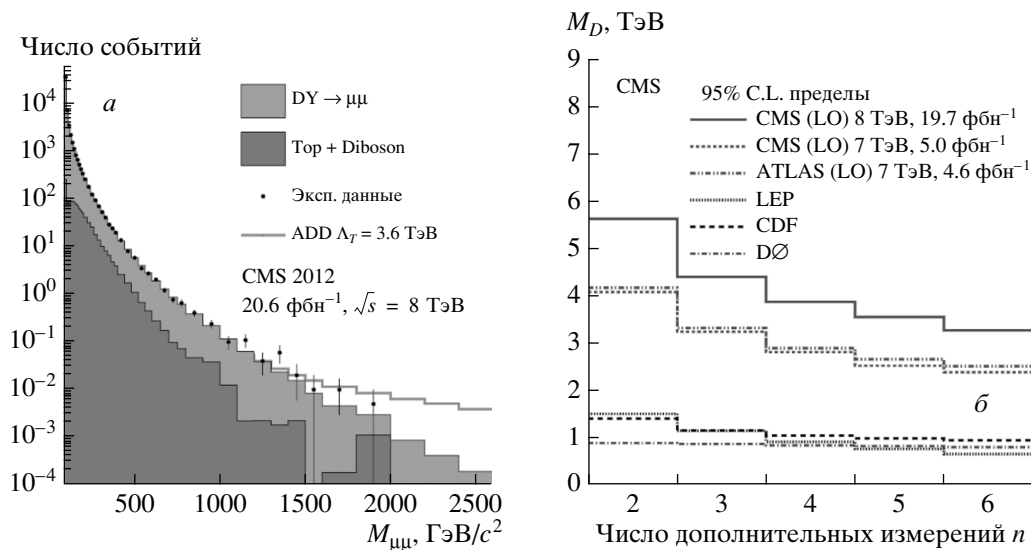


Рис. 2. *a* — Распределение событий с парами мюонов, зарегистрированных установкой CMS, по инвариантной массе (точки с ошибками) при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ. Приведено сравнение с процессами СМ и моделью дополнительных измерений ADD [8]. *б* — Пределы (95% C.L.) на параметры сценария ADD: масштаб обрезания M_S и число дополнительных измерений n [17]. Результаты получены в канале с одиночной струей и потерянной энергией при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ.

КК-гравитонов в процессах с одиночной струей $q\bar{q} \rightarrow gG$, $gq \rightarrow qG$, $gg \rightarrow gG$ или с одиночным фотоном $q\bar{q} \rightarrow \gamma G$, так и через виртуальные обмены.

Вклады от обменов виртуальными гравитонами интерферируют с процессами СМ, идущими через обмен γ^*/Z^0 с рождением пар лептонов, а также дают вклад в процессы рождения пар фотонов. Это вызывает повышенный выход подобных событий, что приводит к значительной модификации спектров их инвариантных масс. Размер области инвариантных масс пар частиц, которая искажается при наличии дополнительных измерений, зависит от фундаментального масштаба гравитации M_D и числа дополнительных измерений n . Величина M_D связана с параметрами вычислительных теорий — обычно она полагается равной или порядка эффективного ультрафиолетового масштаба обрезания теории. При анализе экспериментальных данных используются две схемы перенормировки, в одной из которых ультрафиолетовый масштаб обрезания регулируется одним параметром Λ_T [14], а в другой эффективная теория описывается двумя параметрами: масштабом обрезания M_S и числом дополнительных измерений n [15].

Пример распределения событий по инвариантной массе двух мюонов, зарегистрированных установкой CMS, приведен на рис. 2*a* [8]. Результаты измерений находятся в хорошем согласии с предсказаниями СМ, приведенными на этом же графике. Для сравнения на рисунке также демонстрируется кривая, соответствующая ожиданиям в рамках

модели ADD для величины $\Lambda_T = 3.6$ ТэВ. Аналогичный рисунок для канала с парой фотонов представлен на рис. 1*a* [5]. Полученные ограничения на значение M_S для числа $n = 3-7$ составили на уровне 95% C.L. 3.79–2.53 ТэВ в канале рождения пары фотонов [5] и 4.93–3.30 ТэВ в канале с парой лептонов (комбинированный анализ мюонного и электронного каналов) [8] соответственно. Параметр Λ_T ограничен соответственно значениями 3.18 и 4.14 ТэВ.

Интересной возможностью по обнаружению виртуального рождения КК-гравитонов является изучение угловых распределений двухструйных событий, которые в случае появления сигналов “новой” физики становятся более изотропными, чем предсказывается в КХД. В этом канале на статистике $\mathcal{L}_{\text{int}} = 19.7$ фбн $^{-1}$ при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ получены более сильные ограничения на значение M_S (8.4–5.9 ТэВ для числа $n = 3-6$) и Λ_T (7.1 ТэВ) [16].

Реальный КК-гравитон не распадается на частицы СМ и уносит часть энергии из точки взаимодействия. Таким образом, сигналом прямого рождения гравитона могут быть события с недостающей энергией в конечном состоянии, ассоциированные с рождением одиночной струи или фотона. Статистика подобных событий, набранных экспериментом CMS при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, соответствует интегральной светимости $\mathcal{L}_{\text{int}} \sim 20$ фбн $^{-1}$. В этих каналах многомерный фундаментальный масштаб гравитации M_S ограничен снизу значением 6.09–3.53 ТэВ для числа $n = 2-6$ в канале с одиночной

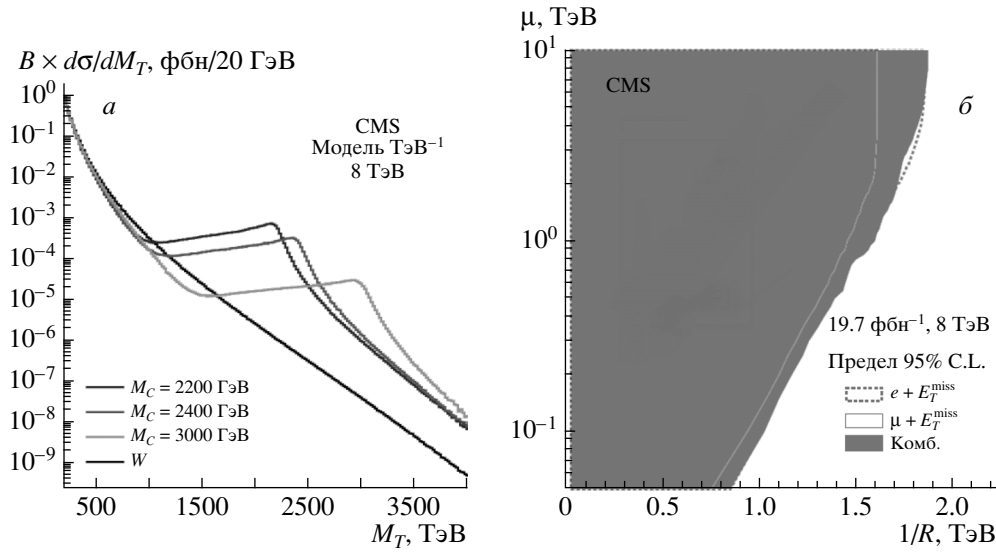


Рис. 3. *а* — Сечения рождения событий $l + E_T^{\text{miss}}$ по поперечной массе M_T в СМ (нижняя кривая) и в модели $T\bar{B}^{-1}$ (три верхних кривых) при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ. *б* — Пределы (95% С.Л.) на параметры сценария UED: радиус дополнительных измерений R и массовый параметр μ [20]. Результаты получены в канале с одиночным лептоном и потерянной энергией при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ.

струей (рис. 2б) [17] и 2.30–2.00 ТэВ для числа $n = 3–6$ в канале с одиночным фотоном [18].

НЕМИНИМАЛЬНЫЕ СЦЕНАРИИ

В отличие от моделей типа RS1 и ADD в некоторых сценариях многомерной квантовой теории поля и гравитации, например в модели $T\bar{B}^{-1}$ [19], многомерными являются не только гравитоны, но и калибровочные поля. Это приводит к появлению спектра массивных КК-мод (с массой порядка нескольких ТэВ) калибровочных бозонов W^\pm и Z^0 (W_{KK} и Z_{KK} — их полные копии по квантовым числам (заряду, спину, лептонному или барионному числу и пр.), но отличающиеся возрастающими массами). Как и обычный нейтральный калибровочный бозон, Z_{KK} может распадаться на пару лептонов или струй, а W_{KK} — на лептон и нейтрино. По аналогии с RS-гравитоном двухчастичные распады Z_{KK} могут быть зарегистрированы в спектре лептонов, струй и калибровочных бозонов (за исключением распадов на пару фотонов), а W_{KK} проявляют себя в событиях с недостающей поперечной энергией. В последнем случае ожидается сигнал в распределениях событий по поперечной массе $M_T = \sqrt{2p_T^l E_T^{\text{miss}}(1 - \cos(\Delta\phi))}$, где $\Delta\phi$ — угол между направлением “утечки” энергии из события E_T^{miss} и заряженным лептоном p_T^l (рис. 3а). В случае одного дополнительного пространственного измерения ограничения на масштаб компактификации дополнительных измерений M_C составили

3.4 ТэВ [20]. Отметим, что предыдущие измерения на LEP2, Tevatron и HERA дают более сильное ограничение на этот параметр — 6.8 ТэВ [21].

“Максимальный” сценарий многомерной теории поля — модель универсальных дополнительных измерений (UED) [22] — предполагает, что все поля СМ (и фермионы, и бозоны) “чувствуют” дополнительные измерения и могут “путешествовать” по ним. Поэтому каждая частица СМ имеет свою бесконечную башню КК-мод. В этом случае КК-моды должны рождаться попарно и распадаться каскадным образом до последней, стабильной, частицы (в полной аналогии с суперсимметричными распадами) — легкой КК-частицы (LKP), которая является естественным кандидатом в частицы темной материи. В некоторых вариантах UED (split-UED [23]) предполагается, что кварки, в отличие от лептонов и калибровочных бозонов, квазилокализованы в дополнительном измерении. В этом случае в силу сохранения КК-четности возможно рождение только четных КК-мод калибровочных бозонов $W_{\text{KK}}^{(2)}, Z_{\text{KK}}^{(2)}, g_{\text{KK}}^{(2)}$. Анализ рождения электронов и мюонов в событиях с недостающей энергией позволил определить пределы (95% С.Л.) на минимальную массу $W_{\text{KK}}^{(2)}$: 1.74 ТэВ/ c^2 для массового параметра модели $\mu = 0.05$ ТэВ/ c^2 и 3.71 ТэВ/ c^2 для $\mu = 10$ ТэВ/ c^2 [20]. Кроме того, были установлены ограничения на радиус дополнительного измерения R в зависимости от μ (рис. 3б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента CMS, обсуждаемые в настоящей работе, совпадают с результатами другого многоцелевого эксперимента на Большом адронном коллайдере — ATLAS [24].

В заключение выражаю благодарность А.В. Ланёву, М.В. Савиной и другим участникам эксперимента CMS за полезные замечания и обсуждения при подготовке этой работы. Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках Соглашения от 17 октября 2014 г. № 14.610.21.0004, идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Chatrchyan *et al.* (CMS Collab.), JINST **3**, S08004 (2008).
2. G. L. Bayatian *et al.* (CMS Collab.), J. Phys. G **34**, 995 (2007).
3. С. В. Шматов, ЯФ **74**, 511 (2011); **76**, 1166 (2013) [Phys. Atom. Nucl. **74**, 490 (2011); **76**, 1106 (2013)]; М. В. Савина, ЯФ **74**, 518 (2011); **76**, 1150 (2013) [Phys. Atom. Nucl. **74**, 496 (2011); **76**, 1090 (2013)].
4. L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. **83**, 3370, 4690 (1999).
5. S. Chatrchyan *et al.* (CMS Collab.), Phys. Rev. Lett. **108**, 111801 (2012).
6. N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, and G. Dvali, Phys. Lett. B **429**, 263 (1998); Phys. Rev. D **59**, 086004 (1999); I. Antoniadis *et al.*, Phys. Lett. B **436**, 257 (1998).
7. V. Khachatryan *et al.* (CMS Collab.), CMS PAS EXO-12-045.
8. V. Khachatryan *et al.* (CMS Collab.), JHEP **1504**, 025 (2015).
9. V. Khachatryan *et al.* (CMS Collab.), Phys. Rev. D **91**, 052009 (2015).
10. S. Chatrchyan *et al.* (CMS Collab.), CMS PAS EXO-12-023.
11. K. Agashe, H. Davoudiasl, G. Perez, *et al.*, Phys. Rev. D **76**, 036006 (2007); A. L. Fitzpatrick, J. Kaplan, L. Randall, *et al.*, JHEP **0709**, 013 (2007); O. Antipin, D. Atwood, and A. Soni, Phys. Lett. B **666**, 155 (2008).
12. V. Khachatryan *et al.* (CMS Collab.), JHEP **1408**, 173 (2014).
13. V. Khachatryan *et al.* (CMS Collab.), JHEP **1408**, 174 (2014).
14. G. F. Giudice, R. Rattazzi, and J. D. Wells, Nucl. Phys. B **544**, 3 (1999).
15. T. Han, J. D. Lykken, and R.-J. Zhang, Phys. Rev. D **59**, 105006 (1999).
16. V. Khachatryan *et al.* (CMS Collab.), Phys. Lett. B **746**, 79 (2015).
17. V. Khachatryan *et al.* (CMS Collab.), Eur. Phys. J. C **75**, 235 (2015).
18. V. Khachatryan *et al.* (CMS Collab.), CMS-EXO-12-047; arXiv:1410.8812.
19. I. Antoniadis, Phys. Lett. B **246**, 377 (1990); I. Antoniadis and K. Benakli, Phys. Lett. B **326**, 69 (1994); I. Antoniadis, K. Benakli, and M. Quirós, Phys. Lett. B **331**, 313 (1994).
20. V. Khachatryan *et al.* (CMS Collab.), Phys. Rev. D **91**, 092005 (2015).
21. K. Cheung and G. Landsberg, Phys. Rev. D **65**, 076003 (2002).
22. T. Appelquist, H.-Ch. Cheng, and B. A. Dobrescu, Phys. Rev. D **64**, 035002 (2001).
23. Seong Chan Park and Jing Shu, Phys. Rev. D **79**, 091702(R) (2009).
24. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>

THE CMS EXPERIMENT SEARCHES
FOR EXTRA SPATIAL DIMENSIONS

S. V. Shmatov

The review of the CMS experiment results on searches for extra spatial dimensions is given, based on pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. The data were collected with the CMS detector during the first run of the Large Hadron Collider.