

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS НА LHC

*И. А. Голутвин*¹, *С. В. Шматов*^{1,2,*}

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Представлены результаты эксперимента CMS, полученные на основе данных первого цикла работы LHC при энергии 7 и 8 ТэВ в с.ц.м. и первых данных второго цикла при энергии 13 ТэВ в с.ц.м. Также обсуждаются перспективы исследований при высоких значениях светимости LHC.

The results of the LHC Run1 and Run2 by the CMS experiments are presented. The research prospects for high luminosity regime are also discussed.

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

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача физики частиц связана с расширением и продолжением в новую область энергий наших знаний о фундаментальных принципах Природы — о свойствах материи и связывающих ее силах, а также о свойствах пространства-времени, где существует и эволюционирует наша Вселенная. Несмотря на отсутствие опровержений предсказаний Стандартной модели взаимодействий элементарных частиц (СМ), их удивительную точность и открытие последнего краеугольного камня — бозона Хиггса, СМ обладает рядом внутренних недостатков и нерешенных проблем, что не позволяет считать ее окончательным вариантом теории.

Решение этих проблем требует привлечения более широких, чем в СМ, групп симметрий или других, совершенно новых теоретических концепций. Многочисленные возможные теоретические сценарии имеют богатую феноменологию с сигналами, доступными для измерения на современных ускорительных комплексах. Поэтому наряду с исследованием свойств бозона Хиггса (а до 2012 г. — с его поисками) систематические исследования сигналов, предсказываемых различными расширениями Стандартной модели, — одна из главных задач эксперимента «Компактный мюонный соленоид» (CMS) [1],

*E-mail: sergei.shmatov@cern.ch

который является одним из двух многоцелевых экспериментальных комплексов, предназначенных для работы на пучках протонов и ядер Большого адронного коллайдера (LHC).

В настоящей работе представлен краткий обзор основных результатов эксперимента CMS, полученных за время первого этапа LHC (Run1) в 2009–2012 гг. при работе на сталкивающихся пучках протонов при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ. Также обсуждаются первые результаты второго этапа LHC (Run2), начавшегося в середине 2015 г. при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Статистика проанализированных данных соответствует полной интегральной светимости 5,1 fb^{-1} за 2011 г., 20,1 fb^{-1} за 2012 г. и 2,8 fb^{-1} за 2015 г.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО ЭТАПА РАБОТЫ LHC

Итогами первого этапа физической программы LHC стал очередной триумф Стандартной модели: был открыт долгожданный бозон Хиггса, а вся совокупность экспериментальных результатов абсолютно не противоречила теоретическим предсказаниям. Более того, были обнаружены и изучены редкие процессы СМ, которые теоретически предсказывались, но до сих пор не наблюдались (совместное рождение tW и распад $B_S \rightarrow \mu^+ \mu^-$), некоторые неожиданные, но не противоречащие СМ явления (дальнодействующие угловые корреляции в pp -столкновениях). Подробная информация о результатах эксперимента CMS по изучению процессов в рамках СМ, открытию и исследованию свойств бозона Хиггса, поиску сигналов «новой» физики за пределами СМ приведена на странице публикаций коллаборации CMS [2] или в обзорах результатов эксперимента (см., например, [3]).

1.1. Бозон Хиггса. Реализация программы поиска бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS началась сразу же после старта LHC при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в 2010 г., а в середине 2011 г. уже были опубликованы первые результаты, которые не продемонстрировали отклонений от СМ. Первые указания на превышение сигнала над фоном СМ были получены к концу 2011 г. на статистике, соответствующей интегральной светимости $\sim 5 \text{fb}^{-1}$ — оба эксперимента зафиксировали сигнал в области 124–126 ГэВ/ c^2 с локальной статистической значимостью $3,5\sigma$ (ATLAS) и $3,1\sigma$ (CMS). Открытие нового бозона состоялось в 2012 г., когда были набраны новые данные при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ и объединенная статистика за 2011 и 2012 гг. была увеличена более чем в 2 раза. При достигнутой интегральной светимости 5,1 fb^{-1} (2011 г.) и 5,3 fb^{-1} (2012 г.) в каждом из экспериментов зафиксирован статистически значимый сигнал в районе 125–126 ГэВ/ c^2 (рис. 1, *a*): не менее 5σ в CMS [4] и $5,9\sigma$ в ATLAS [5].

Сразу после открытия можно было с уверенностью утверждать, что только что открытая частица является новым нейтральным бозоном, а распад на $\gamma\gamma$ явно указывал на его скалярную природу. Но прошел еще почти год, в течение которого проводилось изучение ее свойств (уточнение массы, определе-

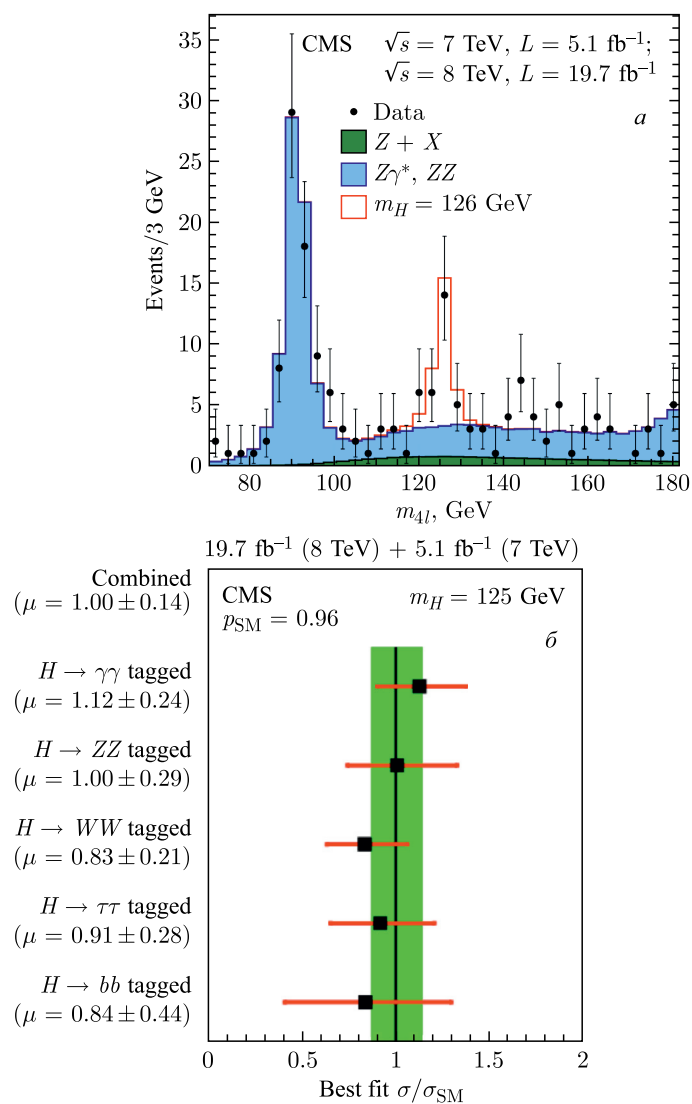


Рис. 1. *a*) Распределение по инвариантной массе четырех лептонов. *б*) Интенсивность сигнала бозона Хигса

ние спина и четности, измерение силы сигнала и констант связи), прежде чем физики смогли с уверенностью сказать, что этот бозон является именно бозоном Хигса СМ. За это время статистика набранных данных при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ была увеличена почти в 4 раза, что позволило не только увеличить статисти-

ческую значимость наблюдавшихся бозонных распадов ($\gamma\gamma$, ZZ , WW), но и наблюдать распады бозона Хиггса на фермионы ($\tau\bar{\tau}$ и $b\bar{b}$) со статистической значимостью $3,8\sigma$.

Вероятность образования новой частицы σ оказалась в согласии с величиной вероятности образования бозона Хиггса, предсказанной в СМ, σ_{SM} , во всех пяти каналах, где был обнаружен сигнал новой частицы (рис. 1, б). Их отношение называется интенсивностью сигнала μ . По результатам измерений во всех пяти каналах значение $\mu = \sigma/\sigma_{\text{SM}} = 1,00 \pm 0,09$ (стат.) $^{+0,008}_{-0,007}$ (теор.) $\pm 0,07$ (сист.) при значении массы $m_H = 125,0$ ГэВ/ c^2 .

Следующим естественным шагом стало точное измерение массы и ширины новой частицы. Для измерения массы нового бозона были использованы два канала ($\gamma\gamma$ и ZZ) с наилучшим массовым разрешением. Масса новой частицы определена без учета каких-либо предположений об относительных вероятностях мод распада и в настоящее время составляет $125,02^{+0,26}_{-0,27}$ (стат.) $^{+0,14}_{-0,15}$ (сист.) ГэВ/ c^2 . В СМ естественная ширина бозона Хиггса с массой 125 ГэВ/ c^2 составляет примерно $4,15$ МэВ/ c^2 . Это намного меньше, чем массовое разрешение в каналах $\gamma\gamma$ и ZZ^* . Поэтому фитированием массового спектра непосредственно в районе пика представляется возможным получить лишь ограничение сверху на наблюдаемую ширину $\Gamma_H < 3,4$ ГэВ/ c^2 . При расширении массовой области выше порога рождения пары Z -бозонов (область вне массовой поверхности была определена как $m_{4l} > 220$ ГэВ/ c^2) удалось установить более строгие ограничения $\Gamma_H < 22$ МэВ/ c^2 , что всего в $5,4$ раза больше теоретического значения.

Важной проверкой свойств открытого бозона является измерение его констант взаимодействия с частицами СМ. Полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных значения масштабных коэффициентов для констант связи, учитывающих возможные изменения сигнала, обусловленные «новой» физикой, не противоречат СМ в пределах теоретических неопределенностей (68 %-й уровень достоверности) как для векторных частиц (W и Z), так и для фермионов (μ , τ , b , t) (рис. 2, а), что также исключает гипотезу фермиофобного (т. е. не распадающегося на фермионы) бозона Хиггса. Важно также отметить, что в безразмерном представлении полученные константы связи имеют линейную зависимость от массы частиц во всем диапазоне их значений от μ до t (рис. 2, б). Это, во-первых, недвусмысленно свидетельствует об универсальном характере взаимодействия бозона Хиггса в фермионном и бозонном секторах, а во-вторых, подтверждает вывод о природе обнаруженного сигнала ($J^{PC} = 0^{++}$).

Для изучения спиновой структуры бозона были использованы так называемые разделители гипотез, представляющие собой комбинацию функций правдоподобия конкурирующих гипотез, т. е. распределения плотностей вероятности угловых и массовых переменных продуктов распада в предположении

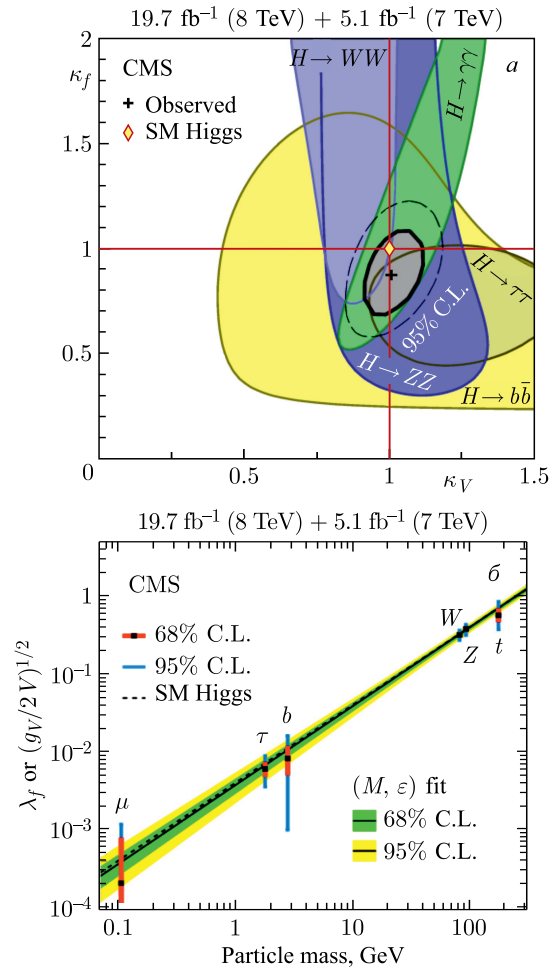


Рис. 2. а) Допустимые значения масштабных коэффициентов для векторных частиц κ_V и фермионов κ_f . б) Зависимость модифицированных констант связи частиц с бозоном Хиггса от их массы в представлении $\kappa_f m_f/\nu$ и $\sqrt{\kappa_V} m_V/\nu$. Вакуумное среднее поля Хиггса $\nu = 246,22$ ГэВ/ c^2

различных значений спина J и четности P . На данных по распаду бозона Хиггса на пару калибровочных бозонов ($ZZ \rightarrow 4l$, $WW \rightarrow l\nu l\nu$, $\gamma\gamma$) были протестированы более десяти различных сочетаний возможных значений J и P , соответствующие псевдоскалярам ($J^P = 0^-, \dots$), тензорным частицам ($J^P = 2^-, 2^+, \dots$) и даже векторным частицам ($J^P = 1^-$ и 1^+), хотя это и запрещено наблюдением распада $\gamma\gamma$ в соответствии с теоремой Ландау–

Янга. Все комбинации, альтернативные гипотезе бозона Хиггса Стандартной модели ($J^P = 0^+$), были отвергнуты с высокой степенью статистической достоверности.

Исключительно важной является проверка гипотезы существования дополнительных скалярных резонансов, например, дополнительных бозонов Хиггса в модели с расширенным хиггсовским сектором. В настоящее время экспериментальных данных CMS вполне достаточно, чтобы полностью исключить их существование на уровне статистической достоверности 95 % в области масс 145–1000 ГэВ/ c^2 в каналах распада на WW и на ZZ (комбинированный анализ по двум каналам). Также пока не видно редких и экзотических (за рамками SM) распадов бозона Хиггса, например, распада на пару мюонов или электронов и так называемых «невидимых» распадов, характеризующихся отсутствием в конечных продуктах распада частиц SM, которые могли бы быть зарегистрированы детекторными системами (распады на четыре нейтрино, легчайшие стабильные суперсимметричные частицы (LSP), частицы темной материи (WIMP) и др.).

1.2. Стандартная модель. В рамках исследований SM были проведены измерения сечений, констант связи, кинематических распределений, корреляций и других характеристик различных процессов образования частиц в процессах сильного и электрослабого взаимодействий. Были обнаружены и изучены редкие процессы, предсказываемые или не противоречащие SM, но до сих пор не наблюдавшиеся, такие как ассоциированное рождение tW (это позволило впервые определить матричный элемент $|V_{tb}| \sim 1$) и дальнедействующие угловые корреляции в pp - и pA -взаимодействиях. Был наблюден распад $B_S \rightarrow \mu^+\mu^-$, вероятность которого составила $\mathcal{B} = (2,8 \pm 0,7) \cdot 10^{-9}$ (по объединенным данным CMS и LHCb), что хорошо согласуется с предсказаниями SM. Результаты измерения вероятности другого редкого распада, $B \rightarrow \mu^+\mu^-$ ($\mathcal{B} = (3,6_{-1,4}^{+1,6}) \cdot 10^{-10}$), демонстрируют легкое отклонение от предсказания SM на уровне статистической значимости 2σ , и окончательную точку в этом вопросе можно будет поставить при значительном увеличении статистики. Также можно отметить результаты по измерению массы топ-кварка ($m_t = (172,44 \pm 0,48)$ ГэВ/ c^2), которые были выполнены с уникальной точностью ($\sim 0,28\%$), и измерение сечений его одиночного и парного рождения с точностью 5,9 и 3,5 % для $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ соответственно, что также превышает точность измерений на ускорителе тэватрон.

1.3. Новая физика. В эксперименте CMS осуществляется обширная программа по поиску возможных сигналов за пределами SM, предсказываемых суперсимметричными теориями, расширенными калибровочными моделями, различными сценариями многомерной теории поля и ТВО. Вся совокупность проведенных измерений показывает, что никаких значимых отклонений экспериментальных данных от SM не обнаружено. Были установлены ограничения на значения параметров различных теоретических моделей: значения

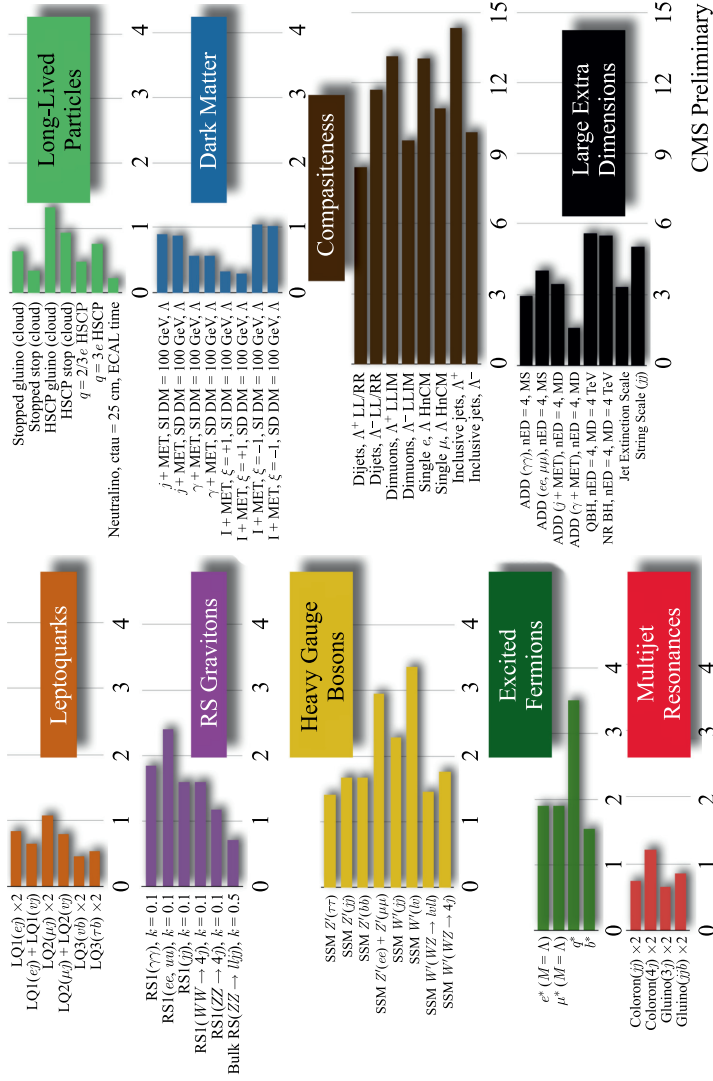


Рис. 3. Сводная таблица по ограничениям на массы гипотетических частиц (в ТэВ/ c^2)

фундаментальных энергетических масштабов, массы новых частиц, констант связи, сечения рождения новых частиц. Сводная таблица по ограничениям на массы различных гипотетических (несуперсимметричных) частиц представлена на рис. 3.

Полученные результаты не «закрывают» ту или иную модель, так как в большинстве случаев полное покрытие пространства параметров моделей лежит за областью возможности LHC. Проблематичной с этой точки зрения выглядит ситуация с простейшими вариантами низкоэнергетической суперсимметрии, которые, по-видимому, закрыты или близки к этому — массы предсказываемых суперсимметричных частиц закрыты до $1400 \text{ ГэВ}/c^2$ для глюино и $650\text{--}900 \text{ ГэВ}/c^2$ для скварков, а для частиц, участвующих в электрослабых взаимодействиях (слептоны и калибрино), до $260\text{--}720 \text{ ГэВ}/c^2$. Тем не менее это не закрывает концепцию даже минимальной суперсимметрии, так как эти ограничения сильно модельно-зависимы и часто получены в различных упрощающих предположениях.

2. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВТОРОГО ЭТАПА LHC

В 2015 г. начался новый этап работы LHC (Run2) при $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$, и к концу года проанализированная в эксперименте CMS интегральная светимость достигла $2,8 \text{ фб}^{-1}$. Как и в начале предыдущего этапа, первыми результатами исследований стало своего рода «переоткрытие» (rediscovery) SM — тщательное исследование всех известных и изученных до сих пор частиц и процессов физики элементарных частиц, измерение сечений, значений масс и т. п. Изучение различных процессов SM на LHC представляет собой важнейший тест теории взаимодействий элементарных частиц в новой области энергий.

Первым шагом в этом направлении стало измерение множественности заряженных адронов: были измерены плотность заряженных адронов в области $\eta \leq 0,5$ ($dN_{\text{ch}}/d\eta = 5,49 \pm 0,01$ (стат.) $\pm 0,017$ (сист.)) и ее зависимость от \sqrt{s} . Полученные результаты оказались в полном соответствии с теоретическими ожиданиями и измерениями при более низких энергиях. Также в полном согласии с SM находятся и результаты измерений характеристик процессов КХД — дифференциальных сечений инклюзивного и парного рождения струй.

В начале Run2 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. Яркой демонстрацией физико-технических возможностей CMS служат измерения спектра инвариантных масс мюонных пар (см. рис. 4, на котором представлены резонансы SM от J/ψ до Z -бозона). Достигнутые характеристики дали возможность провести проверку теории электрослабых взаимодействий в про-

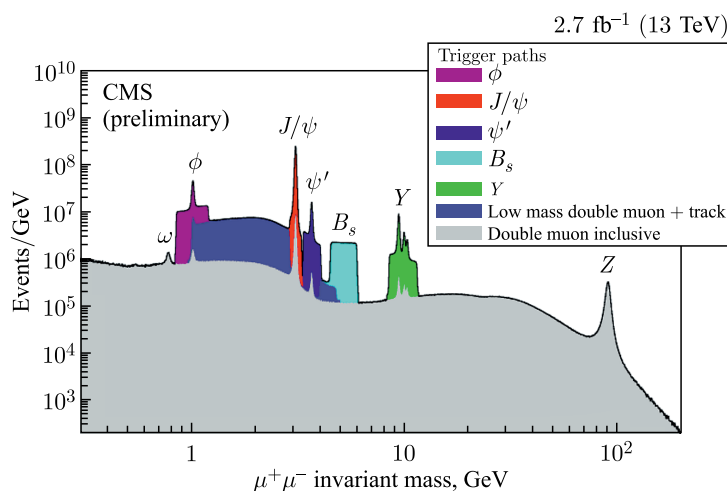


Рис. 4. Распределение событий по инвариантной массе пар мюонов

цессах одиночного и парного рождения калибровочных бозонов и топ-кварка, совместного рождения калибровочных бозонов и струй и т. п. Никаких значимых отклонений от предсказаний теории не наблюдалось (рис. 5). Кроме «переоткрытия» СМ CMS подтвердил существование бозона Хигса в двух наиболее вероятных каналах распада (ZZ и $\gamma\gamma$). Интенсивность сигнала, как и в предыдущих измерениях Run1, не противоречит ожиданиям СМ: $\mu_{ZZ} = 0,82^{+0,57}_{-0,43}$ и $\mu_{\gamma\gamma} = 0,69^{+0,47}_{-0,42}$.

Первые результаты нового сеанса принесли и первую неожиданную интригу. При изучении парного рождения фотонов было обнаружено превышение сигнала над фоном в области $750 \text{ ГэВ}/c^2$ (рис. 6, *a*) [6]. Локальная статистическая значимость сигнала достигла $3,4\sigma$ (рис. 6, *b*). В эксперименте ATLAS подобный сигнал обнаружен даже с еще большей значимостью $3,9\sigma$ [7]. Интересным фактом также является отсутствие в этой области масс какого-либо значимого сигнала в других каналах (с парами лептонов, струй, тяжелых калибровочных бозонов). Для того чтобы подтвердить или опровергнуть данное наблюдение, требуется увеличение статистики до $10\text{--}15 \text{ фб}^{-1}$ *

Другие многочисленные поиски отклонений от предсказаний СМ не принесли результатов, однако позволили улучшить ограничения на массы гипо-

*Дальнейшие исследования, основанные на анализе объединенной статистики новых измерений 2016 г. при $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$ ($3,3 \text{ фб}^{-1}$) и данных при $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$ ($19,7 \text{ фб}^{-1}$) не подтвердили этот результат [8]. В настоящее время можно утверждать, что первоначальное превышение числа событий над ожидаемым значением являлось статистической флуктуацией фона.

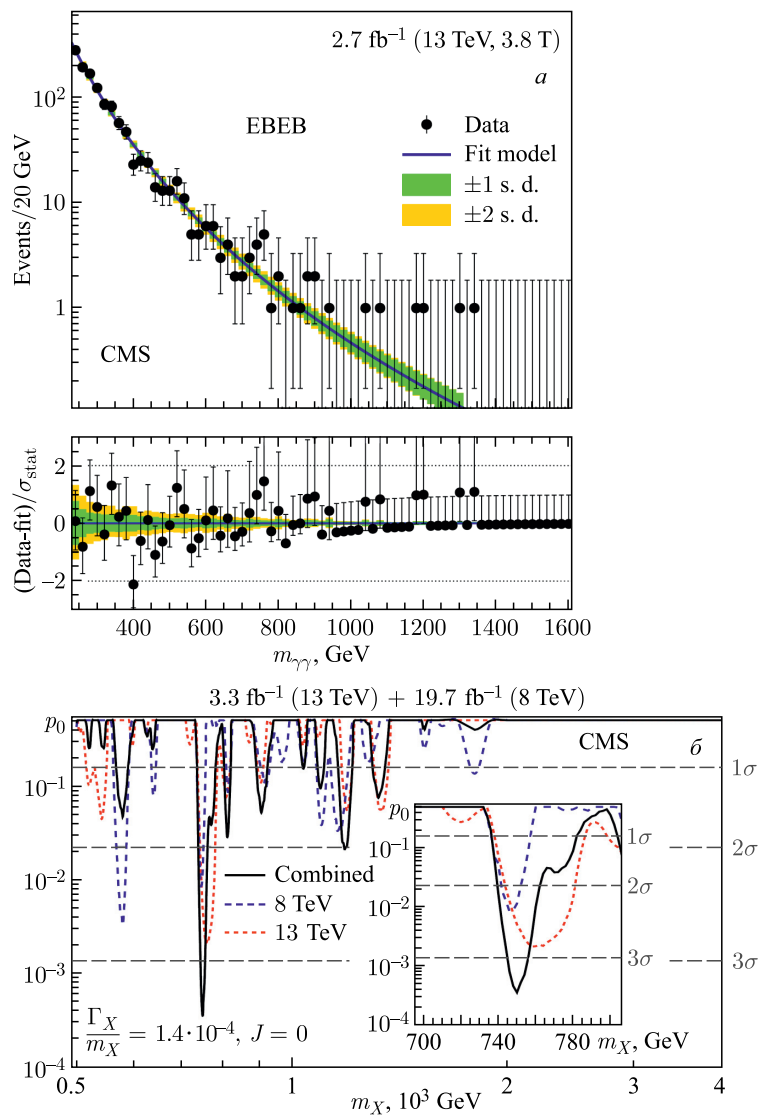


Рис. 6. а) Спектр инвариантных масс пар фотонов. б) Массовая зависимость вероятности флуктуации фона СМ до величины наблюдаемого сигнала (p -value)

тетических частиц и энергетические масштабы новых явлений, полученные на основании данных Run1. Например, пределы на массы нейтральных калибровочных бозонов и КК-моды гравитонов достигли 2,80–3,15 ТэВ/ c^2 и

1,6–3,1 ТэВ/ c^2 соответственно, а ограничения на массы суперсимметричных частиц составили 1,6 ТэВ/ c^2 для глюино и 1,0 ТэВ/ c^2 для легчайшего нейтрино.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Второй этап работы LHC (Run2) при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ (запланировано увеличение энергии до проектного значения 14 ТэВ в с. п. м.) продлится до второй длительной остановки (Long Stop 2, LS2) в конце 2018 г. Ожидается, что за это время интегральная светимость \mathcal{L}_{int} достигнет 100–120 fb^{-1} .

Увеличение почти в 2 раза энергии столкновения пучков (с 8 до 13 ТэВ) обеспечивает рост светимости партонов от 2 до 100(!) раз, т. е. 100 fb^{-1} при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ эквивалентно 1 fb^{-1} при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [9]. Это означает, что всего несколько месяцев второго этапа LHC предоставят больше информации для анализа процессов при больших значениях переданных 4-импульсов, чем весь первый этап.

После LS2 исследования при проектных значениях энергии 13–14 ТэВ и светимости $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (Run3) продлятся до конца 2023 г. (ожидаемая к концу этапа $\mathcal{L}_{\text{int}} \simeq 300 \text{ fb}^{-1}$). Начиная с 2026 г. запланирована работа LHC при повышенной светимости $5 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что позволит увеличить статистику более чем на порядок ($\mathcal{L}_{\text{int}} \simeq 3000 \text{ fb}^{-1}$). Главной целью новых исследований, безусловно, станет дальнейшее тщательное изучение природы бозона Хиггса и поиск возможных отклонений от предсказаний СМ, указывающих на проявления сигналов новых физических явлений. Основной вопрос, на который попытаются ответить в экспериментах на LHC: «Существует ли «новая» физика в энергетическом масштабе порядка ТэВ?» В первую очередь это касается дополнительных бозонов Хиггса с большими массами и низкоэнергетической суперсимметрии, для существования которой эти поиски станут определяющими. В частности, характеристики бозона Хиггса, например, константы его взаимодействия с частицами СМ, будут измерены с точностью до 5–14 и 2–10 % при 300 и 3000 fb^{-1} соответственно [10]. Кроме того, при достижении светимости $\sim 1200 \text{ fb}^{-1}$ станет возможным наблюдение редких распадов бозона Хиггса, таких как $H \rightarrow \mu\mu$. Также, например, можно будет прояснить вопрос с распадом $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$, который (по данным Run1) демонстрирует легкое отклонение от предсказания СМ на уровне статистической значимости 2σ .

Увеличение статистики позволит не только расширить ожидаемые пределы на массы новых частиц (в 2–3 раза), предсказываемых различными моделями за пределами СМ, но и, если они будут обнаружены, провести разделение различных гипотез об их происхождении (определение спина и констант взаимодействия). Что касается суперсимметричных частиц, то при массе нейтрино 0,9–1,2 ТэВ/ c^2 открытие глюино при 300 fb^{-1} возможно, если его

масса не превышает $1,9 \text{ ТэВ}/c^2$, а для \tilde{t} - и \tilde{b} -кварков массовые ограничения составляют $750\text{--}950 \text{ ГэВ}/c^2$ и $600\text{--}700 \text{ ГэВ}/c^2$ соответственно [10].

В заключение авторы выражают благодарность участникам эксперимента CMS за сотрудничество, 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. *CMS Collab.* The CMS Experiment at the CERN LHC // JINST. 2008. V. 3. P. S08004.
2. <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/>
3. Рубаков В. А. К открытию на Большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса // УФН. 2012. Т. 182. С. 1017;
Ланёв А. В. Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики // УФН. 2014. Т. 184. С. 99; Последние результаты коллаборации CMS по поискам физики вне Стандартной модели // ЯФ. 2015. Т. 78. С. 558;
Савина М. В. Поиск калуца-клейновских возбуждений гравитона и микроскопических черных дыр с помощью детектора CMS на LHC // Там же. С. 571;
Шматов С. В. Поиск физики за рамками стандартной модели во взаимодействии протонов при $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$ в эксперименте CMS на LHC // ЯФ. 2013. Т. 76. С. 1166; Обзор результатов эксперимента CMS // ЯФ. 2015. Т. 78. С. 546; Обзор результатов эксперимента CMS на LHC по поиску дополнительных пространственных измерений // ЯФ. 2016. Т. 79. С. 157; Обзор результатов эксперимента CMS // Тр. объединенного семинара RDMS CMS «Физика на LHC». 2016. Т. 4. С. 13.
4. *CMS Collab.* Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC // Phys. Lett. B. 2012. V. 716. P. 30; arXiv:1207.7235.
5. *ATLAS Collab.* Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC // Phys. Lett. B. 2012. V. 716. P. 1; arXiv:1207.7214.
6. *CMS Collab.* Search for New Physics in High Mass Diphoton Events in 3.3 fb^{-1} of Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ and Combined Interpretation of Searches at 8 TeV and 13 TeV. CMS-PAS-EXO-15-005; CMS-PAS-EXO-16-018.
7. *ATLAS Collab.* Search for Resonances Decaying to Photon Pairs in 3.2 fb^{-1} of pp Collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2015-081.
8. *CMS Collab.* Search for High-Mass Diphoton Resonances in Proton–Proton Collisions at 13 TeV and Combination with 8 TeV Search // Phys. Lett. B. 2017. V. 767. P. 147.
9. Stirling W. J. Private Communication.
<http://www.hep.ph.ic.ac.uk/~wstirling/plots/plots.html>.
10. *CMS Collab.* Projected Performance of an Upgraded CMS Detector at the LHC and HL-LHC: Contribution to the Snowmass Process. CMS-NOTE-13-002. arXiv:1307.7135.