

ИЗУЧЕНИЕ БОЗОНА ХИГГСА СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ATLAS И CMS НА LHC

© 2020 г. И. И. Цукерман*

НИЦ “Курчатовский институт” — ИТЭФ, Москва, Россия

Поступила в редакцию 28.09.2019 г.; после доработки 28.09.2019 г.; принята к публикации 28.09.2019 г.

Дается краткий обзор последних результатов экспериментов ATLAS и CMS на LHC по рождению и распаду стандартного бозона Хиггса. Они основаны на данных протон-протонных столкновений при энергии в системе их центра масс 13 ТэВ, набранных в 2015–2018 гг. Измерены сечения рождения бозона Хиггса в четырех основных механизмах и относительные вероятности его распада в наиболее удобных для изучения пяти каналах. В результате объединенного анализа этих каналов измерены константы связи стандартного бозона Хиггса. Все экспериментальные результаты находятся в согласии с предсказаниями СМ. Обсуждаются также перспективы экспериментов ATLAS и CMS по изучению стандартного бозона Хиггса.

DOI: 10.31857/S0044002720020294

ВВЕДЕНИЕ

Большой адронный коллайдер (LHC [1]) в CERN сталкивал протоны с суммарной энергией в системе их центра масс 7 ТэВ в 2010–2011 гг. и 8 ТэВ в 2012 г. После модернизации в 2013–2014 гг. он возобновил работу в 2015 г. уже при 13 ТэВ. На коллайдере эксплуатируются четыре крупные экспериментальные установки: ATLAS [2], CMS [3], LHCb [4] и ALICE [5]. На многоцелевых детекторах ATLAS и CMS за период 2015–2018 гг. была набрана статистика, эквивалентная интегральной светимости около 150 фбн^{-1} , и достигнута дифференциальная светимость LHC $2 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что вдвое превышает проектную. Основными задачами этих детекторов являются изучение бозона Хиггса (h) и других частиц Стандартной модели (СМ) в новом диапазоне энергий и поиск новых частиц за ее пределами. Бозон Хиггса в СМ обеспечивает все фундаментальные частицы, включая себя, массами. Его масса является единственным свободным параметром в теории; из требования пертурбативной унитарности следует, что $m_h < 1 \text{ ТэВ}$. Ожидается, что квантовые числа бозона Хиггса и вакуума совпадают; т.е. $J^P = 0^+$. Десять лет назад про массу бозона Хиггса было известно следующее. В экспериментах на электрон-позитронном коллайдере LEP было получено ограничение снизу $m_h > 114.4 \text{ ГэВ}$ на 95%-ном уровне достоверности [6]. С другой стороны, из теоретического анализа

прецизионных электрослабых данных следовало ограничение сверху $m_h < 152 \text{ ГэВ}$ [7], при этом предсказывалось среднее значение массы $94_{-24}^{+29} \text{ ГэВ}$. Поэтому неудивительно, что в середине 2012 г. эксперименты ATLAS и CMS сообщили об открытии бозона Хиггса с массой 125 ГэВ [8, 9].¹⁾ Интересно отметить, что бозон Хиггса с такой массой мог бы быть обнаружен и в России, если бы проект ускорительно-накопительного комплекса (УНК) в Протвино с суммарной энергией протонов 6 ТэВ [11] был реализован.

Предсказанное сечение рождения h для $m_h = 125 \text{ ГэВ}$ на протон-протонном коллайдере растет с энергией с 20 пбн при 8 ТэВ до 50 пбн при 13 ТэВ [12]. При энергиях LHC выделяют четыре основных механизма рождения h : слияние глюонов (ggF) через петли тяжелых кварков (в основном, топ-кварков), слияние векторных бозонов (VBF), когда его рождение сопровождается двумя адронными струями, летящими под малыми полярными углами, совместное рождение с векторным бозоном (Vh , где V обозначает W или Z) и слияние топ- и анти топ-кварков. При энергии 13 ТэВ доминирующим является механизм ggF , механизмы VBF (Vh , tth) дают в 10 (в несколько десятков) раз меньший вклад в полное сечение рождения h .

В табл. 1 показаны ожидаемые относительные вероятности распада (BR) по наиболее удобным

¹⁾В экспериментах на протон-антипротонном коллайдере Тэватрон в США суммарная статистическая значимость сигнала от бозона Хиггса составила лишь три стандартных отклонения [10].

*E-mail: zuckerma@cern.ch

Таблица 1. Предсказанные в СМ относительные вероятности разных каналов распада бозона Хиггса и ожидаемое количество событий при интегральной светимости LHC 140 фбн⁻¹ и энергии 13 ТэВ в идеальном детекторе при условии 100%-ной эффективности

Мода распада	Относительная вероятность, %	Экспериментальное наблюдение	Количество событий
$h \rightarrow bb$	57.5 ± 1.9	В основном в процессах Vh и tth	≈ 100 тыс.
$h \rightarrow WW^*$	21.6 ± 0.9	Лептонные распады обоих W^*	≈ 70 тыс.
$h \rightarrow \tau\tau$	6.30 ± 0.36	В основном в механизме VBF	≈ 40 тыс.
$h \rightarrow ZZ^*$	2.67 ± 0.11	Лептонные распады обоих Z^*	≈ 1 тыс.
$h \rightarrow \gamma\gamma$	0.228 ± 0.011	Нужно хорошее разрешение для γ	≈ 20 тыс.
$h \rightarrow Z\gamma$	0.155 ± 0.014	Лептонные распады Z	≈ 1 тыс.
$h \rightarrow \mu\mu$	0.022 ± 0.001	Нужно хорошее разрешение для μ	≈ 2 тыс.

для экспериментальной регистрации модам распада бозона Хиггса с массой 125 ГэВ [12]. Наиболее вероятен (58%) распад $h \rightarrow bb$, для его экспериментальной регистрации лучше всего использовать механизмы рождения Vh и tth . Канал $h \rightarrow WW^*$ удобнее наблюдать, когда оба W -бозона распадаются на $\mu\nu$ или $e\nu$ ($BR \approx 1\%$). Однако из-за наличия двух нейтрино не удастся хорошо восстановить массу бозона Хиггса. К наиболее “чистым” модам распада можно отнести $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ (здесь и далее под l понимается электрон или мюон) с $BR \approx 1.3 \times 10^{-4}$, $h \rightarrow \gamma\gamma$ с $BR \approx 2.3 \times 10^{-3}$ и $h \rightarrow \mu\mu$ с $BR \approx 2.2 \times 10^{-4}$. В последних двух случаях проблемой является подавление большого фона. Канал $h \rightarrow \tau\tau$ экспериментально наблюдаем в моде рождения VBF или в случае, если бозон Хиггса имеет большой поперечный импульс. Также в табл. 1 показано ожидаемое число событий при интегральной светимости 140 фбн⁻¹ при 13 ТэВ, если считать, что они регистрируются в идеальном детекторе со 100%-ным захватом.

ИЗМЕРЕНИЯ БОЗОННЫХ МОД РАСПАДА БОЗОНА ХИГГСА

Характерной чертой распада $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ является наличие двух пар изолированных лептонов с разным знаком заряда. Распределения по инвариантной массе m_{4l} , измеренные в экспериментах ATLAS и CMS после объединения всех лептонных комбинаций, показаны на рис. 1. В области 125 ГэВ четко видны максимумы над фоном. На статистике, эквивалентной 80 фбн⁻¹, в эксперименте ATLAS увидели 195 событий в области инвариантных масс 115–130 ГэВ при ожидаемом сигнале от бозона Хиггса СМ 112 ± 5 событий и оцененном фоне 59 ± 4 события [13]. Сила сигнала, определяемая

как отношение измеренного числа событий к ожидаемому, оказалась равной $\mu = 1.19 \pm 0.16$. Измеренное сечение рождения h (σ_h) в рабочем объеме установки, близком к ее геометрическому захвату, составило 4.0 ± 0.5 фбн, в согласии с предсказанием СМ 3.35 ± 0.15 фбн. σ_h в различных модах рождения бозона Хиггса, помноженное на BR ($h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$), показано на рис. 2а. Отклонений от СМ не обнаружено. В эксперименте CMS на полной статистике 2016–2018 гг. (137 фбн⁻¹) было обнаружено 356 событий с m_{4l} в интервале 117–130 ГэВ при ожидаемых сигнале и фоне около 230 (110) событий соответственно [14]. Величина μ оказалась равной 0.94 ± 0.11 . Измеренное сечение в рабочем объеме установки составило 2.7 ± 0.3 фбн, что согласуется с рассчитанной величиной 2.76 ± 0.14 фбн. Нормированные на предсказанные СМ σ_h в различных механизмах рождения, полученные в эксперименте CMS, показаны на рис. 2б. Они хорошо согласуются с единицей.

В канале $h \rightarrow \gamma\gamma$ среднее отношение сигнала к фону составляет всего 2% и критическим является хорошее разрешение по инвариантной массе фотонов, $m_{\gamma\gamma}$. Для повышения статистической значимости сигнала события подразделяются на категории, учитывающие рассчитанное разрешение по $m_{\gamma\gamma}$ и отношение сигнала к фону. Обработанная статистика в эксперименте ATLAS соответствует интегральной светимости 80 фбн⁻¹, а в CMS — 36 фбн⁻¹. Измеренные величины μ и сечения в рабочем объеме в эксперименте ATLAS составили 1.06 ± 0.13 и 60.4 ± 8.5 фбн [15]. Последняя величина хорошо согласуется с расчетным сечением 63.5 ± 3.5 фбн. В эксперименте CMS μ оказалось равным $1.18^{+0.17}_{-0.14}$, а рабочие сечения: измеренное — 84 ± 13 фбн и рассчитанное в СМ —

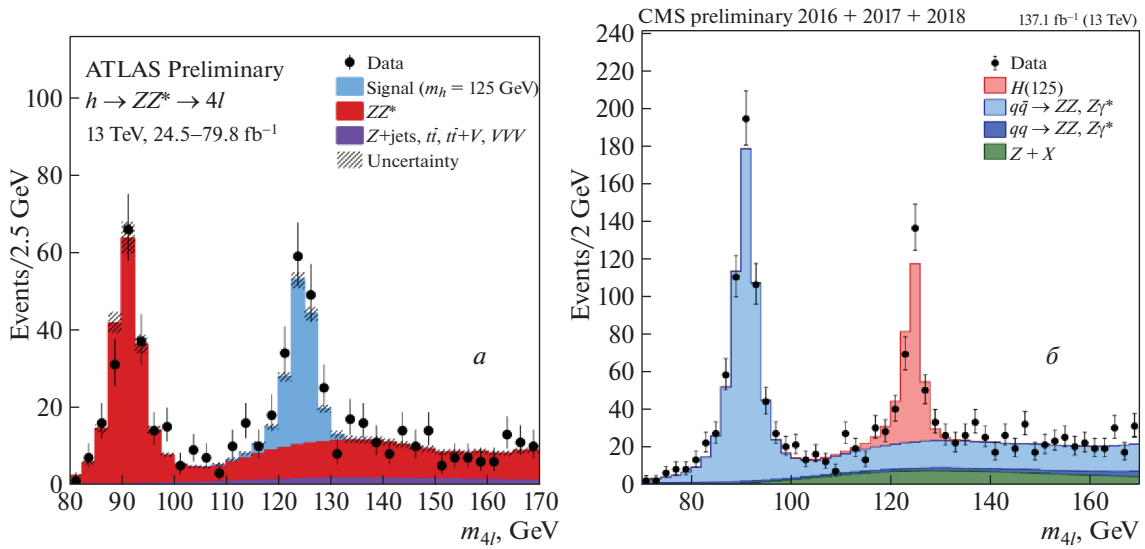


Рис. 1. Измеренное распределение по инвариантной массе четырех лептонов при 13 ТэВ для восстановления бозона Хиггса в канале распада $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$. *a* — Результат эксперимента ATLAS [13], *б* — результат эксперимента CMS [14].

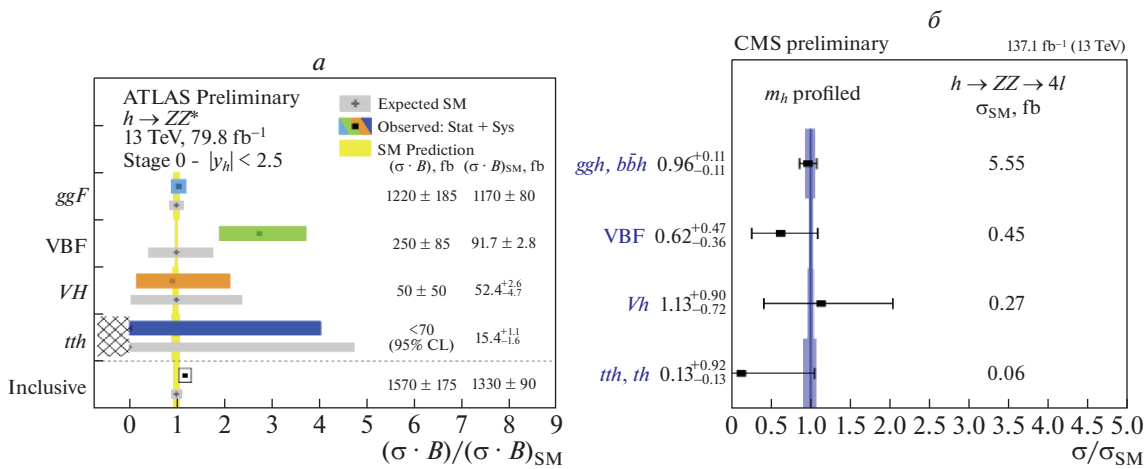


Рис. 2. Результаты изучения бозона Хиггса в канале распада $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ в экспериментах ATLAS и CMS при 13 ТэВ. *a* — Измеренные в эксперименте ATLAS сечения в основных механизмах рождения, помноженные на $\text{BR}(h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l)$ [13], *б* — измеренные в эксперименте CMS силы сигнала в основных механизмах рождения в единицах СМ [14].

73 ± 4 фбн [16, 17]. Отметим, что новый предварительный результат CMS для констант связи в механизмах ggF и VBF, полученный на статистике 77 фбн^{-1} , таков: $\mu(ggF) = 1.15 \pm 0.15$ и $\mu(\text{VBF}) = 0.8^{+0.4}_{-0.3}$ [18]. На рис. 3 показаны измеренные в экспериментах ATLAS и CMS сечения в различных механизмах рождения. В обоих экспериментах не видно отклонений от СМ.

Характерной чертой распада $h \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ является наличие двух изолированных лептонов разного знака заряда и заметная величина недостающей поперечной энергии E_T^{miss} , связанной с двумя нерегистрируемыми нейтрино. Поэтому на-

прямую измерить массу h в таких событиях нельзя. Вместо этого меряется так называемая поперечная масса. События разделяют на несколько категорий в зависимости от числа адронных струй (0, 1 или 2) с большим поперечным импульсом. В случае их отсутствия или наличия одной струи доминирует механизм рождения ggF , в то время как двухструйные события в основном связаны с VBF. Результаты обоих экспериментов основаны на статистике 36 фбн^{-1} , в случае эксперимента ATLAS исследовалось только конечное состояние $e\nu\mu\nu$ и механизм рождения Vh не рассматривался. Наблюдаемая (ожидаемая) значимость сигнала в механизме рождения ggF при массе 125 ГэВ соста-

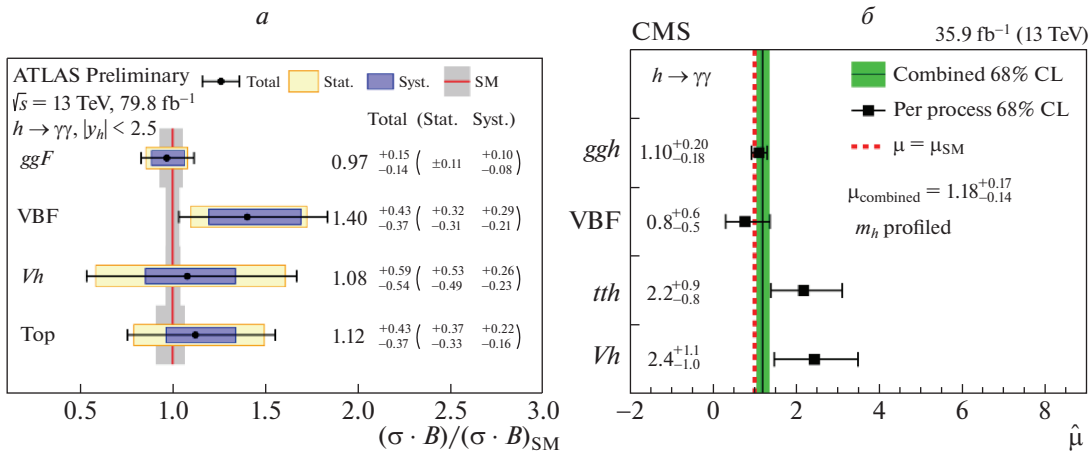


Рис. 3. Измеренные сечения бозона Хиггса в основных механизмах рождения, помноженные на $BR(h \rightarrow \gamma\gamma)$ и нормированные на предсказания СМ. *a* — Результат эксперимента ATLAS [15], *б* — результат эксперимента CMS [16, 17].

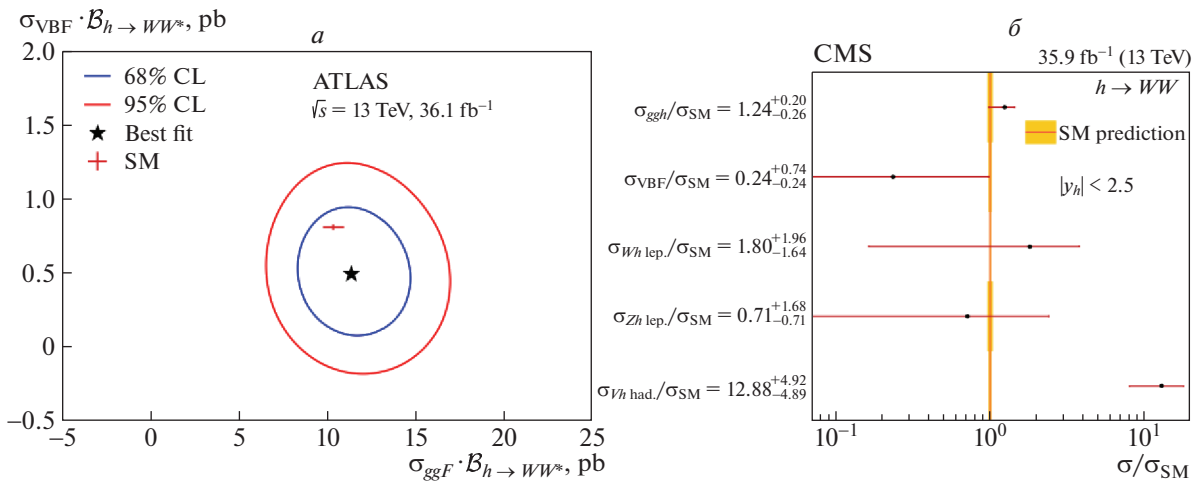


Рис. 4. Результаты изучения бозона Хиггса в канале $h \rightarrow WW^*$ в экспериментах ATLAS и CMS при 13 ТэВ. *a* — Корреляция между измеренными в эксперименте ATLAS сечениями рождения в механизмах ggF и VBF [19], *б* — нормированные на СМ сечения рождения в различных механизмах в эксперименте CMS [21].

вила 6.0σ (5.3σ) соответственно. Соответствующая величина силы сигнала получилась равной $1.10 \pm \pm 0.20$ [19]. Для механизма VBF соответствующие величины значимости — 1.9σ и 2.6σ , а величина $\mu = 0.62 \pm 0.36$. Корреляция между ggF - и VBF-сечениями показана на рис. 4а. Существенных отклонений от СМ не наблюдается. Отметим также, что новый предварительный результат эксперимента ATLAS по Vh -рождению таков: наблюдаемая значимость сигнала — 4.1σ при ожидаемой 1.9σ [20]. Объединенная по разным каналам рождения сила сигнала от $h \rightarrow WW^*$ в единицах СМ, полученная в эксперименте CMS, оказалась равной 1.28 ± 0.18 , при этом $\mu(ggF) = 1.38^{+0.21}_{-0.24}$, а $\mu(VBF) = 0.29^{+0.66}_{-0.29}$ [21]. Наблюдаемая значимость сигнала от $h \rightarrow WW^*$ — 9.1σ при ожидаемой 7.1σ .

Кроме того, в эксперименте CMS были измерены сечения в рабочем объеме установки, из которых были извлечены нормированные на СМ сечения в различных механизмах рождения (рис. 4б). Заметных отклонений от СМ не видно.

ИЗМЕРЕНИЯ ФЕРМИОННЫХ МОД РАСПАДА БОЗОНА ХИГГСА

Характерная черта распада $h \rightarrow \tau\tau$ — два хорошо восстановленных тау-лептона с инвариантной массой вблизи m_h . Они распадаются на заряженные лептоны или адроны с испусканием нейтрино. Для увеличения значимости сигнала события подразделяются на категории с помощью МС-моделирования; наиболее важные категории —

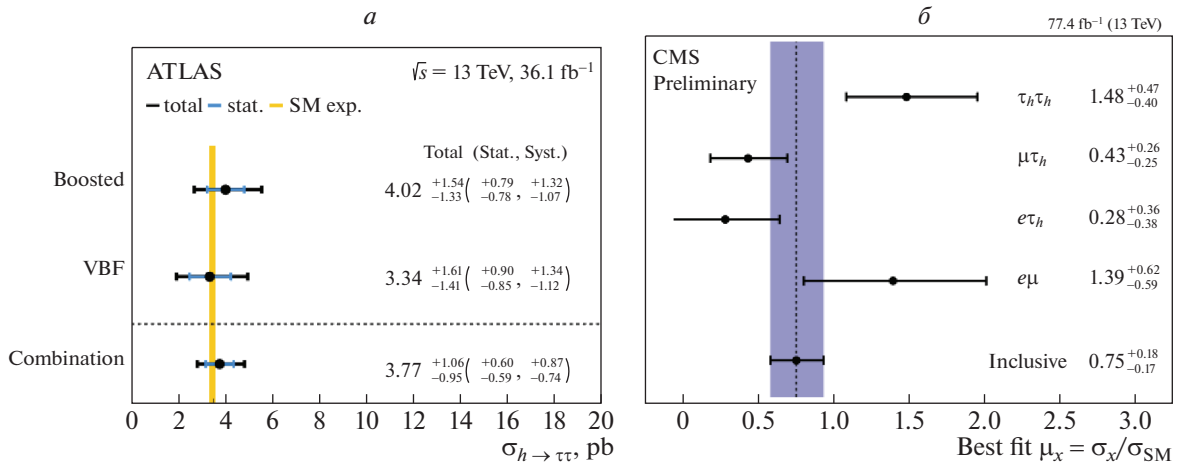


Рис. 5. Результаты изучения бозона Хиггса в канале $h \rightarrow \tau\tau$ в экспериментах ATLAS и CMS при 13 ТэВ. *a* — Измеренное в эксперименте ATLAS сечение бозона Хиггса в основных механизмах рождения, помноженное на $\text{BR}(h \rightarrow \tau\tau)$ [22]. *б* — Измеренные в эксперименте CMS силы сигнала в основных механизмах рождения в единицах СМ [24].

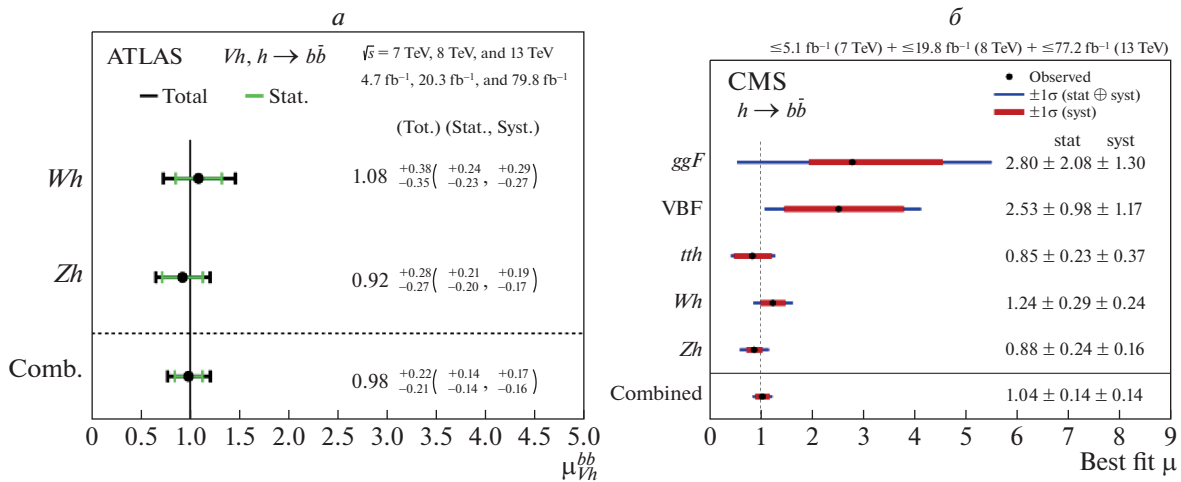


Рис. 6. Измеренные в экспериментах ATLAS и CMS силы сигнала от $h \rightarrow b\bar{b}$ в единицах СМ. *a* — Результаты эксперимента ATLAS для рождения бозона Хиггса в механизме рождения Vh при 13 ТэВ [25] до и после их объединения с более старыми результатами при 7 и 8 ТэВ. *б* — Результат эксперимента CMS для рождения бозона Хиггса в разных механизмах при 13 ТэВ [26] после их объединения с более старыми результатами при 7 и 8 ТэВ.

VBF и рождение бозона Хиггса с большим поперечным импульсом. В обоих экспериментах ATLAS и CMS были проанализированы наборы данных, соответствующие интегральной светимости 36 фбн^{-1} . Наблюдаемая (ожидаемая) значимость сигнала в эксперименте ATLAS составила 4.4σ (4.1σ) соответственно [20]. Ее величина возрастает до 6.4σ (5.4σ), если объединить результаты, полученные при 13 ТэВ, со старыми результатами, полученными при 7 и 8 ТэВ. Соответствующая величина силы сигнала в единицах СМ получилась равной 1.09 ± 0.36 . Отклонений от СМ не обнаружено. На рис. 5а показаны экспериментально измеренные сечения на установке ATLAS в упомянутых выше категориях событий. Они соответству-

ют сечениям, предсказанным СМ. Наблюдаемая значимость сигнала от $h \rightarrow \tau\tau$ в эксперименте CMS составляет 4.9σ при ожидаемой 4.7σ [23]. После объединения результатов, полученных при энергии 13 ТэВ, с более старыми результатами при 7 и 8 ТэВ эти значимости увеличиваются до 5.9σ каждая. Предварительный результат CMS на статистике 77 фбн^{-1} таков: сила сигнала в единицах СМ — 0.75 ± 0.18 , ее величины для каждой из мод рождения показаны на рис. 6б [24]. Отклонений от СМ не видно.

Характерной особенностью канала распада $h \rightarrow b\bar{b}$ является наличие двух адронных струй, происходящих из b -кварков, с инвариантной массой около m_h . Вдобавок в механизме Vh имеет смысл

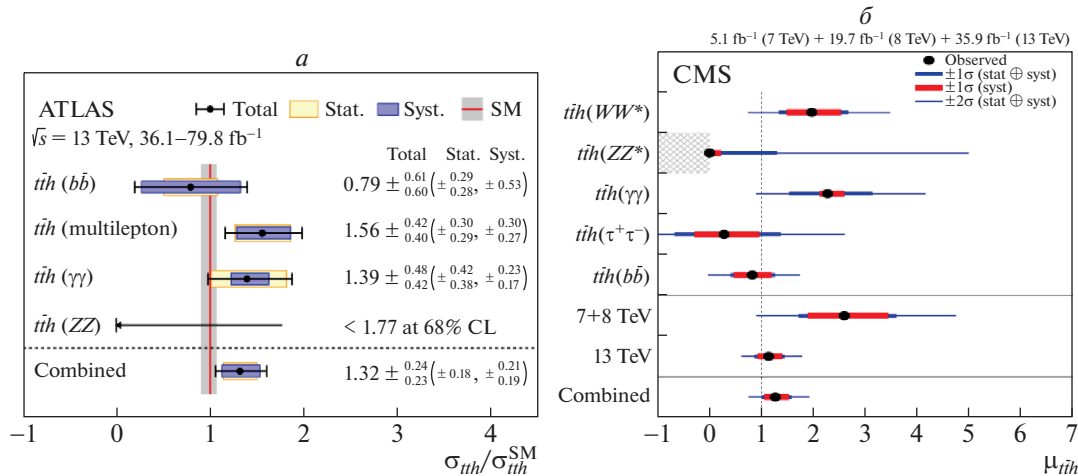


Рис. 7. Измеренные в экспериментах ATLAS и CMS силы сигнала от $t\bar{t}h$. *a* — Результат эксперимента ATLAS, основанный на статистике 36–80 fb^{-1} при 13 ТэВ [27]. *б* — Результат эксперимента CMS, основанный на статистике 36 fb^{-1} при 13 ТэВ [28] до и после их объединения с более старыми результатами при 7 и 8 ТэВ.

отбирать события только с жестким(и) лептоном(ами) или большой E_T^{miss} , в зависимости от конечного состояния, на которое распадается W или Z . Для выделения сигнала над фоном был проделан многомерный анализ, который был успешно протестирован на сходном с сигналом по сигнатуре процессе $(W/Z)Z$ -рождения с последующим распадом $Z \rightarrow b\bar{b}$. Статистика, используемая для анализа канала $h \rightarrow b\bar{b}$ в обоих экспериментах, соответствует интегральной светимости 80 fb^{-1} . Наблюдаемая (ожидаемая) значимость сигнала от этого распада в механизме рождения Vh — 4.9σ (4.4σ) соответственно в эксперименте ATLAS [25]. После объединения результатов, полученных при 13 ТэВ, с более старыми измерениями при 7 и 8 ТэВ, значимости возрастают до 5.4σ (5.5σ). Соответствующая величина $\mu = 0.98 \pm 0.22$. На рис. 6а показаны измеренные величины отдельно для мод рождения Wh и Zh . Отклонений от СМ не найдено. В эксперименте CMS наблюдаемая значимость сигнала от $h \rightarrow b\bar{b}$ в моде рождения Vh составляет 4.8σ при ожидаемой 4.9σ [26]. Они возрастают до 5.6σ (5.5σ) соответственно, если объединить результаты по всем механизмам рождения. Сила сигнала в единицах СМ, измеренная для каждого механизма рождения h в объединенном образце событий при 7, 8 и 13 ТэВ, показана на рис. 6б. Результаты согласуются с СМ.

ИЗУЧЕНИЕ РОЖДЕНИЯ БОЗОНА ХИГГСА В МЕХАНИЗМЕ $t\bar{t}h$

Механизм ассоциативного рождения бозона Хиггса с двумя топ-кварками изучался как для многолептонного конечного состояния, так и для конечных состояний $b\bar{b}$ и $\gamma\gamma$. Оба эксперимента

использовали многомерный анализ для выделения сигнала над фоном. Измеренная в эксперименте ATLAS величина $\mu = 1.32^{+0.28}_{-0.26}$ соответствует наблюдаемой (ожидаемой) значимости сигнала 5.8σ (4.9σ) соответственно [27]. Эта значимость увеличивается до 6.3σ (5.1σ), если объединить результаты при 13 ТэВ (основанные на статистике 36–80 fb^{-1}) с более старыми результатами при 7 и 8 ТэВ. Величины силы сигнала в единицах СМ, измеренные в эксперименте ATLAS в разных конечных состояниях, показаны на рис. 7а. Отклонений от СМ не найдено. Наблюдаемая значимость сигнала от $t\bar{t}h$ -рождения в эксперименте CMS в объединенном наборе данных при 13 ТэВ (36 fb^{-1}), 7 ТэВ и 8 ТэВ составляет 5.2σ при ожидаемой 4.2σ [28]. Измеренная величина силы сигнала в единицах СМ — $\mu = 1.26^{+0.31}_{-0.26}$. Она показана на рис. 7б совместно с соответствующими величинами для отдельных конечных состояний. Результаты хорошо согласуются с СМ.

КОМБИНАЦИЯ РАЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ РОЖДЕНИЯ И РАСПАДОВ БОЗОНА ХИГГСА

Результаты, полученные для упомянутых выше каналов распада бозона Хиггса, были объединены, чтобы извлечь силу сигнала при 13 ТэВ в различных механизмах рождения (рис. 8) и распада (рис. 9). Глобальная сила сигнала в единицах СМ, измеренная в эксперименте ATLAS (CMS) оказалась равной $1.13^{+0.09}_{-0.08}$ (1.17 ± 0.10), что согласуется с теорией [29, 30]. Все четыре основных механизма рождения бозона Хиггса видны со значимостью более пяти стандартных отклонений в каждом из экспериментов. Измеренные силы сигнала в каждом

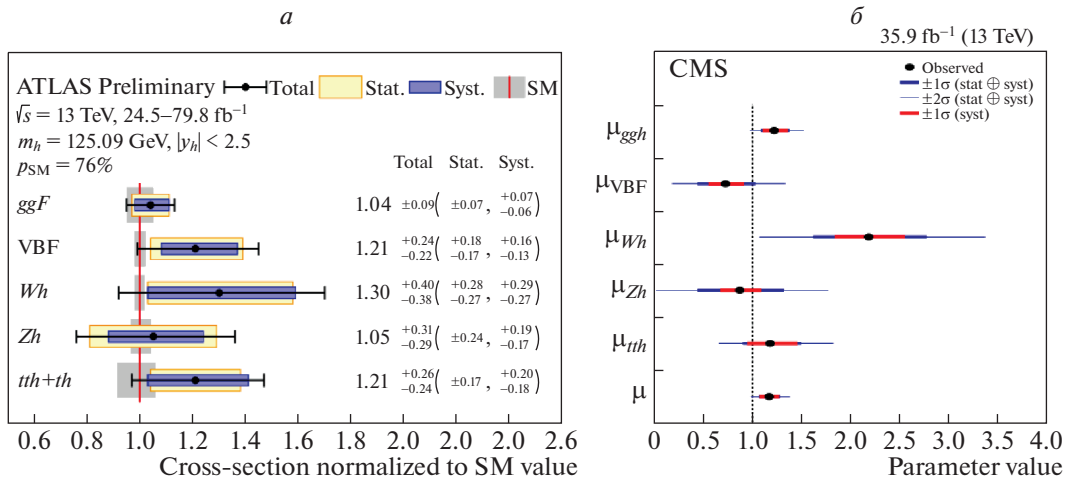


Рис. 8. Измеренные сечения рождения бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS при 13 ТэВ в различных механизмах при допущении того, что вероятности его распадов по разным каналам соответствует СМ. *a* — Результат эксперимента ATLAS [29]. *б* — Результат эксперимента CMS [30].

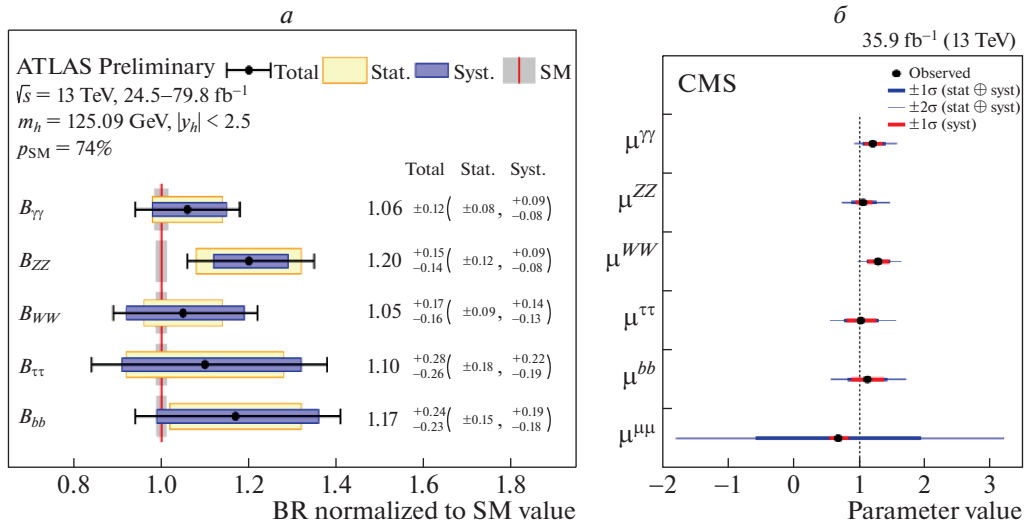


Рис. 9. Измеренные относительные вероятности распада бозона Хиггса по основным пяти каналам в экспериментах ATLAS и CMS при допущении того, что сечения его рождения по разным каналам соответствуют СМ. *a* — Результат эксперимента ATLAS [29]. *б* — Результат эксперимента CMS [30].

из механизмов рождения тоже согласуются с ожиданиями при допущении того, что относительные вероятности распадов h соответствуют СМ. Можно сделать аналогичный вывод и по измеренным BR распадов бозона Хиггса, если предположить, что сечения его рождения в различных механизмах такие же, как в СМ. Для уменьшения погрешности измерения нужно обработать большую статистику данных.

ПЕРСПЕКТИВЫ ЛНС ПО ИЗУЧЕНИЮ СТАНДАРТНОГО БОЗОНА ХИГГСА

В 2019–2020 гг. проводится модернизация ЛНС, а также экспериментов ATLAS и CMS

для их возможности работать при повышенной энергии 14 ТэВ и более высокой светимости $3 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. За 3 года набора данных в 2021–2023 гг. при интегральной светимости 300 фбн^{-1} планируется измерить константы связи h в пяти основных модах распада с точностью не хуже 10–20%, а также обнаружить более редкие распады $h \rightarrow \mu\mu$ и $h \rightarrow Z\gamma$. Позднее, в 2024–2026 гг. предполагается дальнейшая модернизация ЛНС (HL-LHC) и упомянутых экспериментов для успешной эксплуатации при светимости $7 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Затем за период 2026–2037 гг. планируется набрать интегральную светимость 3000 фбн^{-1} , что позволит измерить константы

связи в распадах $h \rightarrow \mu\mu$ и $h \rightarrow Z\gamma$ с точностью 15–30% и попытаться увидеть редкие распады типа $h \rightarrow J/\Psi\gamma$ и $h \rightarrow Y\gamma$. При удачном стечении обстоятельств вероятно даже удастся измерить сечение парного рождения бозонов Хиггса σ_{hh} и оценить константу связи hhh . Более подробная информация содержится в [31].

Что касается более далеких перспектив, то CERN планирует увеличить энергию существующего коллайдера LHC вдвое (до 27 ТэВ, HE-LHC) и набрать статистику, эквивалентную интегральной светимости 15000 фбн^{-1} . Это позволит измерить константу связи hhh с точностью $\approx 15\%$ и увидеть исключительно сложный для экспериментального наблюдения распад $h \rightarrow c\bar{c}$. Параллельно с этим в окрестностях Женевы проектируется новый кольцевой коллайдер (FCC) с окружностью около 100 км. Пока неизвестно, будет ли это электрон-позитронный (ee), электрон-протонный (eh) или протон-протонный (pp) ускоритель. Более подробную информацию можно найти в [32]. Аналогичный проект (CEPC) существует в Китае [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя данные, набранные на LHC при 7–13 ТэВ, сотрудничества ATLAS и CMS обнаружили четыре основных механизма рождения и пять основных мод распада бозона Хиггса. Были измерены их сечения и относительные вероятности. Они все согласуются с СМ. Упомянутые эксперименты планируют улучшения текущих измерений, используя новые данные при 13 ТэВ и, в будущем, при 14 ТэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Evans and P. Bryant, JINST **3**, S08001 (2008).
2. ATLAS Collab., JINST **3**, S08003 (2008).
3. CMS Collab., JINST **3**, S08004 (2008).

4. LHCb Collab., JINST **3**, S08005 (2008).
5. ALICE Collab., JINST **3**, S08002 (2008).
6. R. Barate *et al.*, Phys. Lett. B **565**, 61 (2003).
7. <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>
8. ATLAS Collab., Phys. Lett. B **716**, 1 (2012).
9. CMS Collab., Phys. Lett. B **716**, 30 (2012).
10. CDF and D0 Collab., Phys. Rev. Lett. **109**, 071804 (2012).
11. V. I. Balbekov, Preprint IHEP 93-27 (1993).
12. D. de Florian, C. Grojean, F. Maltoni, C. Mariotti, A. Nikitenko, M. Pieri, P. Savard, M. Schumacher, R. Tanaka, R. Aggleton, M. Ahmad, B. Allanach, C. Anastasiou, W. Astill, S. Badger, M. Badziak, *et al.*, arXiv: 1610.07922.
13. ATLAS Collab., Preprint ATLAS-CONF-2018-018 (2018).
14. CMS Collab., Preprint CMS-PAS-HIG-2019-001 (2019).
15. ATLAS Collab., Preprint ATLAS-CONF-2018-028 (2018).
16. CMS Collab., JHEP **1811**, 185 (2018).
17. CMS Collab., JHEP **1901**, 189 (2019).
18. CMS Collab., Preprint CMS-PAS-HIG-18-029 (2019).
19. ATLAS Collab., Phys. Lett. B **789**, 508 (2019).
20. ATLAS Collab., arXiv: 1903.10052 (accepted to Phys. Lett. B).
21. CMS Collab., Phys. Lett. B **791**, 96 (2019).
22. ATLAS Collab., Phys. Rev. D **99**, 072001 (2019).
23. CMS Collab., Phys. Lett. B **779**, 283 (2018).
24. CMS Collab., Preprint CMS-PAS-HIG-18-032 (2019).
25. ATLAS Collab., Phys. Lett. B **786**, 59 (2018).
26. CMS Collab., Phys. Rev. Lett. **121**, 121801 (2018).
27. ATLAS Collab., Phys. Lett. B **784**, 173 (2018).
28. CMS Collab., Phys. Rev. Lett. **120**, 231801 (2018).
29. ATLAS Collab., Preprint ATLAS-CONF-2019-005 (2019).
30. CMS Collab., EPJ C **79**, 421 (2019).
31. ATLAS and CMS Collab., arXiv: 1902.10229, Part 3.
32. <https://fcc-cdr.web.cern.ch/>
33. CEPC Study Group, arXiv: 1809.00285.

MEASUREMENTS OF THE SM-LIKE HIGGS BOSON BY ATLAS AND CMS EXPERIMENTS AT THE LHC

I. I. Tsukerman
(ATLAS and CMS Collaborations)

NRC “Kurchatov Institute” — ITEP, Moscow, Russia

Recent results on Higgs boson production and decays in the ATLAS and CMS experiments at the LHC are reviewed. They are based on the analyses of 13-TeV LHC proton–proton collision data accumulated during 2015–2018 year exposures. Cross sections in four production channels and branching ratios of five main decays are measured. These channels are combined to extract the Higgs boson signal strength and couplings. All experimental results are found to be compatible with the Standard Model predictions. Perspectives of the ATLAS and CMS experiments on Higgs boson studies are also discussed.