

# НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS НА LHC ПО ПОИСКУ ФИЗИКИ ЗА РАМКАМИ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

*С. В. Шматов\**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Приводится краткий обзор результатов эксперимента CMS на Большом адронном коллайдере по поиску физики за рамками Стандартной модели в хиггсовском секторе. Исследования основаны на данных, набранных детектором CMS во время первого и второго циклов работы LHC.

The paper presents a short review of the CMS Collaboration results of searches for physics beyond the Standard Model in Higgs sector. The studies are based on data recorded by the CMS detector during the CERN LHC Run-I and Run-II.

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

## ВВЕДЕНИЕ

Программа физических исследований эксперимента «Компактный мюонный соленоид» (CMS) на Большом адронном коллайдере (LHC) по обнаружению новой физики за рамками Стандартной модели (BSM) представляет собой широкомасштабный поисковый эксперимент, направленный на обнаружение ожидаемых отклонений от предсказаний Стандартной модели (SM) в различных каналах [1]. CMS ведет поиск сигналов от новых физических объектов и явлений, предсказываемых суперсимметричными моделями, моделями расширенного калибровочного сектора, моделями техницвета, сценариями многомерных теорий и многими другими. Обзоры с подробным описанием результатов даны, например, в [3]. Сводная таблица по ограничениям на массы различных гипотетических частиц представлена на рис. 1.

---

\*E-mail: shmatov@cern.ch

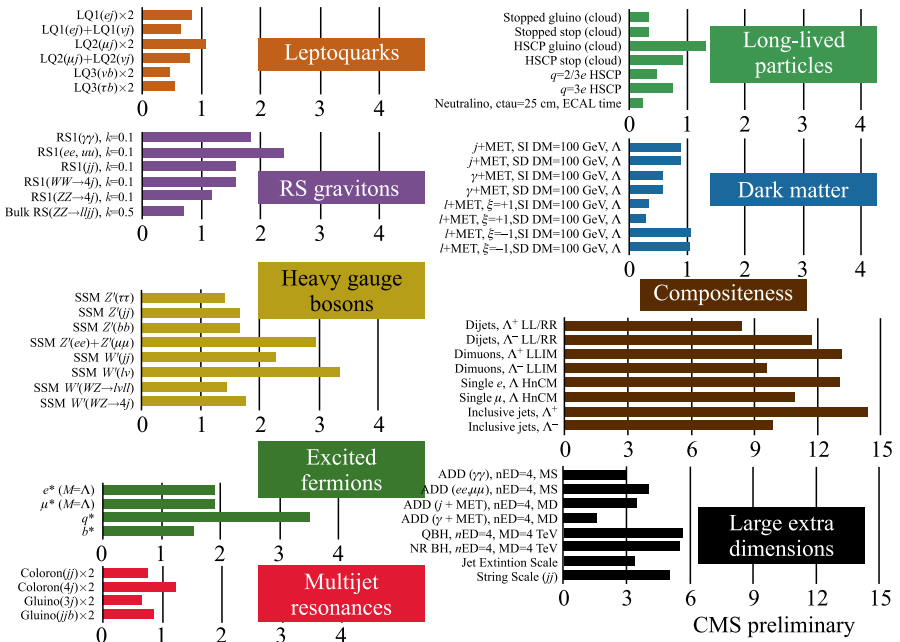


Рис. 1. Сводная таблица по ограничениям на массы гипотетических частиц

После открытия в 2012 г. в экспериментах ATLAS и CMS нового бозона пристальное внимание было приковано к исследованиям его свойств. Сразу после открытия можно было с уверенностью утверждать, что только что открытая частица является новым нейтральным бозоном (по наличию распада  $\gamma\gamma$ ), но прошел еще почти год, в течение которого проводились изучения ее свойств (уточнение массы, определение спина и четности, измерение силы сигнала и констант связи), прежде чем физики смогли с уверенностью сказать, что этот бозон является именно бозоном Хиггса Стандартной модели (пока нет никаких указаний на «нестандартную» физику). Таким образом, в 2012 г. начался новый этап исследований в экспериментальной физике элементарных частиц, который включает не только прецизионные измерения характеристик бозона Хиггса для окончательного доказательства его природы (окно для новой физики еще существует), но и поиски новых хиггсовских бозонов, которые указывали бы на физику за пределами СМ (см., например, обзор [4]).

Первые результаты второго этапа работы LHC при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ подтвердили выводы, полученные в 2011–2013 гг., — интенсивность сигнала

рождения бозона Хиггса в различных каналах, парциальные ширины распадов, спин, четность — все указывает на бозон Хиггса Стандартной модели. В этом ряду особое место занимают поиски и изучение редких распадов бозона Хиггса, таких как  $H \rightarrow \mu^+ \mu^- / e^+ e^-$  или  $H \rightarrow Z \gamma$  и  $H \rightarrow \gamma^* \gamma$ . С одной стороны, прецизионное изучение таких процессов может окончательно подтвердить «стандартность» новой частицы, а с другой, если будут обнаружены отклонения от ожидаемых вероятностей распадов, может послужить указанием на новую физику. Кроме того, распад  $H \rightarrow \mu^+ \mu^-$  может позволить провести измерение юкавской константы связи бозона Хиггса и второго поколения фермионов, что важно для понимания механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии в СМ. Также многообещающими являются нестандартные распады бозона Хиггса, т. е. процессы, отсутствующие в Стандартной модели, которые в случае обнаружения будут являться прямыми указаниями на новую физику. Среди них так называемые «невидимые» распады с прямо не детектируемыми частицами в конечном состоянии, распады на долгоживущие частицы (LLP), распады с нарушением лептонного числа (LFV) и др.

В работе представлены основные результаты эксперимента CMS по поиску сигналов физики за рамками СМ в хиггсовском секторе. Для анализа использованы данные, полученные в столкновении пучков протонов во время первого и второго этапов работы LHC (Run-I и Run-II) при  $\sqrt{s} = 7, 8$  (Run-I) и 13 ТэВ (Run-II) соответственно.

## 1. РЕДКИЕ РАСПАДЫ

В СМ наблюдение распада бозона Хиггса с массой 125 ГэВ/ $c^2$  на два мюона с брэнчингом  $\mathcal{B}_{\text{SM}}(H \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 2,2 \cdot 10^{-4}$  находится на границе чувствительности LHC, а распад на два электрона  $\mathcal{B}_{\text{SM}}(H \rightarrow e^+ e^-) \approx 9 \cdot 10^{-9}$  вообще недоступен для измерения (возможно только установление верхнего ограничения на величину брэнчинга). Для  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ ограничения на величины  $\sigma \mathcal{B}(H \rightarrow \mu^+ \mu^-)$  и  $\sigma \mathcal{B}(H \rightarrow e^+ e^-)$  составляют 0,033 и 0,041 пб соответственно [2], что в  $7,0 \cdot 10^5$  и  $3,7 \cdot 10^5$  раз больше значений, ожидаемых в СМ (рис. 2). Таким образом, текущие верхние ограничения на вероятности распадов составляют  $\mathcal{B}(H \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 0,0016^*$  и  $\mathcal{B}(H \rightarrow e^+ e^-) = 0,0019$ . Следовательно, никаких противоречий с предсказаниями СМ не выявлено, более того, с учетом наблюдения в Run-I распада бозона Хиггса на пару  $\tau$ -лептонов с интенсивностью сигнала  $\mu = 0,78 \pm 0,27$  [5]\*\*, т. е. с вероятно-

\*Для анализа мюонного канала также были использованы данные при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ.

\*\*На основе данных Run-II при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ значение  $\mu = 1,06_{-0,24}^{+0,25}$  [6].

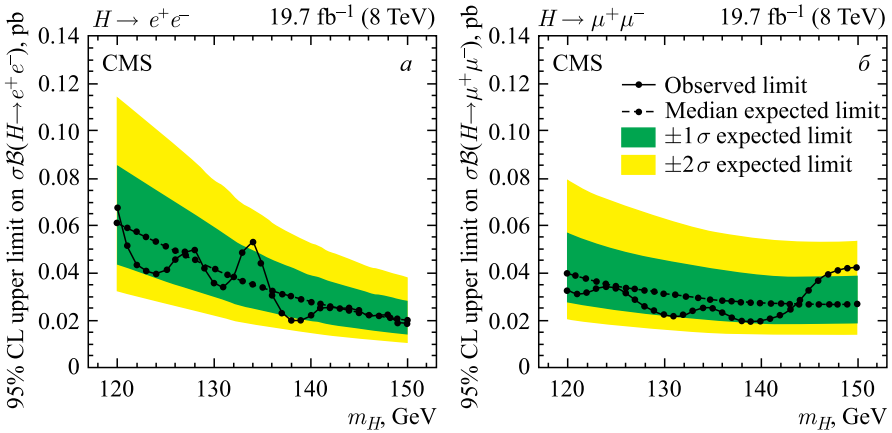


Рис. 2. Предел (95 %-й уровень доверительной вероятности) на сечение  $\sigma\mathcal{B}$  для  $H \rightarrow e^+e^-$  (а) и  $H \rightarrow \mu^+\mu^-$  (б) при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ [2]

стью распада, близкой к значению СМ  $\mathcal{B}_{\text{SM}}(H \rightarrow e^+e^-) = 0,0632 \pm 0,0036$  [7], получено подтверждение предсказываемой СМ ароматовой неуниверсальности лептонных констант связи нового бозона.

Другие интересные с точки зрения поиска новой физики редкие распады (типа  $H \rightarrow Z\gamma$  или  $H \rightarrow \gamma^*\gamma$ ) могут быть чувствительны к расширенному хиггсовскому сектору и присутствию новых скаляров или пар заряженных частиц, которые могут давать вклады в петлевые диаграммы этих процессов независимо от механизма рождения бозона Хиггса. Поиск распада  $H \rightarrow Z\gamma$  проводился в наиболее чистом канале распада  $Z$  на пару  $e^+e^-$  и  $\mu^+\mu^-$  в массовом диапазоне  $m_{ll\gamma}$  от 120 до 160 ГэВ/ $c^2$ , в котором значения брэнчинга согласно СМ не превышают 0,11–0,25 % [8]. Для обнаружения распада  $H \rightarrow \gamma^*\gamma$  использовался этот же канал, но в более узком диапазоне значений  $m_{ll\gamma}$  от 120 до 150 ГэВ/ $c^2$ . Для отделения распадов  $H \rightarrow \gamma^*\gamma$  от  $H \rightarrow Z\gamma$  налагалось дополнительное ограничение на величину инвариантной массы  $m_{ll} < 20$  ГэВ/ $c^2$ . Наблюдаемый предел (95 %-й уровень доверительной вероятности) на сечение  $\sigma\mathcal{B}(H \rightarrow Z\gamma)$  составил от 4 до 25 величин значения, предсказываемого СМ, а при  $m_{ll\gamma} = 125$  ГэВ/ $c^2$  наблюдаемый предел превысил значение СМ на порядок [9]. Это означает, что данные ЛHC исключают все модели за рамками СМ, дающие усиления выхода бозона Хиггса по этому каналу более чем на порядок. В свою очередь, для  $m_H = 125$  ГэВ/ $c^2$  распад  $\sigma\mathcal{B}(H \rightarrow \gamma^*\gamma)$  был ограничен значением 7,3 фб, что в 6,7 раз больше аналогичного значения в СМ [10].

## 2. НЕВИДИМЫЕ РАСПАДЫ И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Невидимые распады могут служить сигналом образования таких частиц, как рассматриваемые кандидаты на роль темной материи (например, нейтрально как LSP в суперсимметричных моделях), или нерегистрируемых частиц

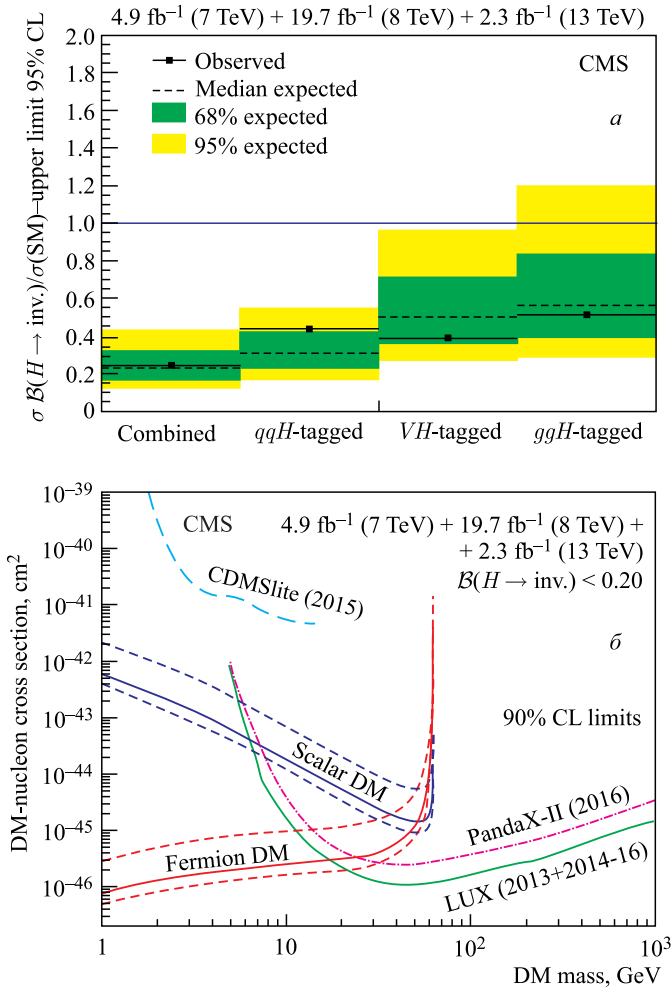


Рис. 3. а) Наблюдаемые и ожидаемые пределы на  $\sigma \mathcal{B}(H \rightarrow \text{inv.}) / \sigma(\text{SM})$  при уровне доверительной вероятности 95% в различных каналах рождения бозона Хиггса:  $qqH$ ,  $VH$ ,  $ggF$  и для комбинации всех трех каналов вместе. б) Предел (90%-й уровень доверительной вероятности) на сечение взаимодействия частиц темной материи (скаляров или фермионов) и частиц СМ (нуклонов). Также приведены результаты экспериментов LUX, PandaX-II и CDMSlite по прямой регистрации ТМ [11]

типа гравискаляра в моделях с дополнительными измерениями. Подобные распады характеризуются большой величиной недостающей поперечной энергии, измеряемой вместе с другими хорошо выделяемыми «метящими» сигналами, которые характеризуют механизмы рождения бозона Хиггса, например, в процессах ассоциируемого рождения бозона Хиггса и векторного бозона ( $VH$ ,  $V = W/Z$ ) при аннигиляции кварков ( $q\bar{q} \rightarrow VH$ ) или слиянии глюонов ( $gg \rightarrow VH$ ), двух струй при рождении бозона Хиггса при слиянии векторных бозонов (VBF,  $qq \rightarrow qqH$ ) или двух глюонов ( $gg \rightarrow ggH$ ). Анализ данных 2012, 2013 и 2015 гг. [11], набранных экспериментом CMS при  $\sqrt{s} = 7, 8$  и 13 ТэВ, проводился как в наиболее чувствительном канале распада  $Z$ -бозона на пару лептонов  $l^+l^-$  или  $b\bar{b}$  (мода рождения  $ZH$ ), так и в адронных модах распада  $Z$  с ассоциированным рождением двух струй (мода рождения  $ggH$ ). Комбинация всех каналов (рис. 3, а) позволила установить верхний предел на брэнчинг  $\mathcal{B}(H \rightarrow \text{inv.}) = 0,24$  (95 %-й уровень доверительной вероятности).

Эти же данные (использовался  $\mathcal{B}(H \rightarrow \text{inv.}) < 0,20$  при 90 %-м уровне доверительной вероятности) позволили измерить предел на сечение взаимодействия частиц темной материи (ТМ) с нуклонами (рис. 3, б). В области масс частиц ТМ менее 20 ГэВ/ $c^2$  получены более строгие ограничения по сравнению с результатами прямых экспериментов по детектированию ТМ.

### 3. НАРУШЕНИЕ ЛЕПТОННОГО ЧИСЛА

В СМ распады бозона Хиггса с нарушением лептонного числа, такие как  $H \rightarrow e\mu$ ,  $e\tau$ ,  $\mu\tau$ , запрещены. Подобные распады могут иметь место в различных моделях за рамками СМ: в моделях с более чем одним дублетом бозонов Хиггса, в моделях составного бозона Хиггса, суперсимметричных сценариях, сценариях с дополнительными измерениями и т. д. Поиск распада  $H \rightarrow \mu\tau$  на основе данных ЛHC Run-I продемонстрировал отклонения данных от фона (рис. 4, а) со статистической значимостью  $2,4\sigma$  [12], что обусловило приоритет подобных исследований и во время ЛHC Run-II. Анализ данных 2016 г., соответствующих  $35,9 \text{ фб}^{-1}$ , не подтвердил ранее наблюдаемое небольшое отклонение сигнала от фона [13]. Установленный предел на брэнчинг этого распада  $\mathcal{B}(H \rightarrow \mu\tau) < 0,25\%$  оказался в полном согласии с ожидаемым в рамках СМ (0,25 %) (рис. 4, б).

Стоит отметить, что в каналах  $H \rightarrow e\tau$  и  $H \rightarrow e\mu$  никаких отклонений от предсказаний СМ не было отмечено ни при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ, ни при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ. Верхние пределы (95 %-й уровень доверительной вероятности) наблюдаемых (ожидаемых) вероятностей распада по этим каналам составили  $\mathcal{B}(H \rightarrow e\tau) < 0,69(0,75)\%$  и  $\mathcal{B}(H \rightarrow e\mu) < 0,035(0,048)\%$  в Run-I [14] и  $\mathcal{B}(H \rightarrow e\tau) < 0,61(0,37)\%$  в Run-II [13].

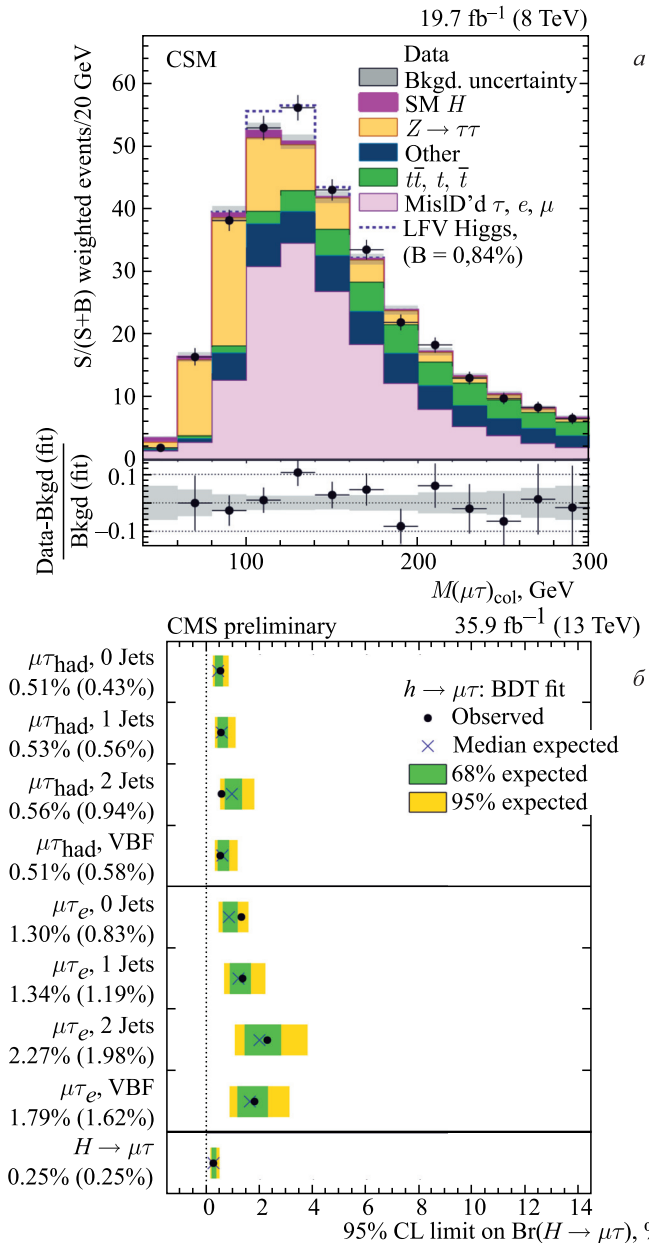


Рис. 4. a) Распределение инвариантной массы пары  $\mu\tau$ , нормированное на отношение  $S/(S+B)$ , для данных при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ [12]. б) Предел (95%-й уровень доверительной вероятности) на брэнчинг распада  $H \rightarrow \mu\tau$  на основе данных при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ [13]

#### 4. РАСПАДЫ НА ЭКЗОТИЧЕСКИЕ ЧАСТИЦЫ

Кроме редких или запрещенных в СМ распадов в ряде сценариев новой физики возможны распады бозона Хиггса на экзотические частицы  $H \rightarrow \text{BSM}$ . Непрямые оценки вероятностей таких процессов (на основе анализа вероятностей всех наблюдаемых каналов распада бозона Хиггса) на объединенных данных экспериментов ATLAS и CMS дали верхний предел на  $\mathcal{B}(H \rightarrow \text{BSM}) = 34\%$  [15]. Также на LHC возможно вести прямые поиски таких распадов, как распады на легкие скаляры или псевдоскаляры. Достаточно легкие хиггсовские  $a$ -состояния присутствуют, например, в двухдублетной хиггсовской модели (2HDM) или неминимальных суперсимметричных моделях типа NMSSM. Во всех этих вариантах возможны распады  $H \rightarrow aa$  ( $a$  — гипотетический скаляр или псевдоскаляр), которые могут быть, в свою очередь, обнаружены в каналах, аналогичных распаду стандартного хиггсовского бозона.

Во время Run-I в эксперименте CMS предпринята попытка обнаружения пары легких бозонов с массами от 5 до 62,5 ГэВ/ $c^2$  в трех каналах:  $H \rightarrow aa \rightarrow 4\tau$ ,  $H \rightarrow aa \rightarrow 2\mu 2b$ ,  $H \rightarrow aa \rightarrow 2\mu 2\tau$ . Сигналов новых частиц обнаружено не было, а пределы (95 %-й уровень доверительной вероятности) на величину  $\sigma_h/\sigma_{\text{SM}} \mathcal{B}(H \rightarrow aa)$  в контексте модели 2HDM с добавочным синглетом (2HDM+S) соответственно составили 17, 16 и 4% [16].

Интересно отметить, что в случае, когда масса дополнительных хиггсовских бозонов достаточно мала ( $2m_\mu < m_a < 2m_\tau$ ), вероятность их распада на пару  $\mu^+\mu^-$  существенно выше, чем для стандартного бозона Хиггса, что дополнительно мотивирует исследования в канале с парами мюонов. Полученные результаты изучения вероятности образования четырехмюонных состояний могут трактоваться в рамках модели NMSSM как возможный канал распада  $h_{1,2} \rightarrow 2a_1 \rightarrow 2\mu$  (рис. 5, а)\*. С другой стороны, подобные распады

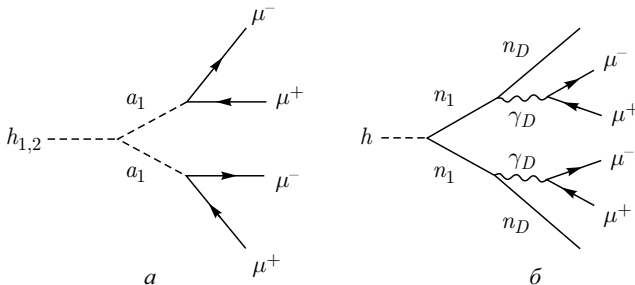


Рис. 5. а) Распад скалярных хиггсовских состояний в модели NMSSM. б) Распад легчайшего нейтралино в модели со скрытым (темным) сектором

\*В NMSSM присутствуют 3 CP-четных бозона Хиггса  $h_{1,2,3}$  и 2 CP-нечетных (псевдоскалярных).



предсказывает и вариант суперсимметричной модели со скрытым (темным) сектором, в которой наличие легких темных фотонов  $\gamma_D$  и темных фермионов (темных нейтрино)  $n_D$  приводят к нестабильности видимых легчайших нейтрино  $n_1$ . В случае  $m_h > 2m_{n_1}$  и в предположении распадов  $\gamma_D$  только на частицы СМ становится возможным распад  $h_1 \rightarrow 2n_1 \rightarrow 2n_D + 2\gamma_D \rightarrow 2n_D + 2\mu$  (рис. 5, б). Данные Run-I и первые данные Run-II не выявили значимого сигнала в предполагаемом массовом диапазоне бозона  $a_1$  от 0,25 до 8,5 ГэВ/ $c^2$  [17].

### 5. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ БОЗОНЫ ХИГГСА

Выше мы уже упоминали о различных сценариях физики за рамками СМ, которые предсказывают дополнительные хиггсовские состояния. В настоящее время наиболее обсуждаемыми среди них являются модели с расширенным хиггсовским сектором (типа 2HDM), различные реализации идеи суперсимметрии (MSSM, NMSSM, Dark SUSY и т.д.), модели с дополнительными измерениями, модели холодной темной материи (CDM) со скрытым хиггсовским сектором, различные расширения калибровочного сектора СМ. Эти модели включают в себя либо аналоги бозона Хиггса СМ (в других массовых диапазонах, скрытых секторах и пр., но с теми же квантовыми числами), либо целый спектр состояний со своей массовой иерархией, отличающихся к тому же зарядами и четностью.

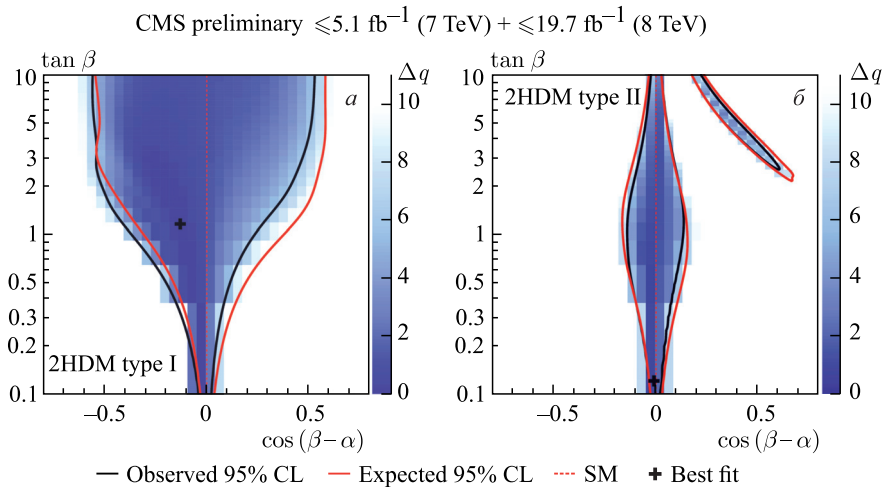


Рис. 6. Ограничения на пространство модельных параметров для 2HDM type I (a) и 2HDM type II (б) [18]

Как в случае распадов  $H \rightarrow \text{BSM}$ , для поиска новых хиггсовских состояний используются прямые и непрямые методы. В последнем случае проводится комплексный анализ констант связи, измеряемых при изучении различных каналов рождения и распада бозона Хиггса  $SM$  с  $\gamma\gamma$ ,  $ZZ \rightarrow 4l$ ,  $WW \rightarrow 2l2\nu$ ,  $\tau\tau$ ,  $bb$  в конечном состоянии. По ограничениям на величину модификаторов констант связи извлекаются ограничения на параметры моделей  $\text{BSM}$ . Так, например, на рис. 6 приведены пределы на значения параметров модели  $2\text{HDM}$  для двух случаев: все хиггсовские состояния могут распадаться как на верхние, так и на нижние фермионы (type I) (рис. *a*), а один из  $SU(2)_L$ -дублетов преимущественно связан с верхними фермионами, а другой дублет — с нижними (type II) (рис. *b*).

**Благодарности.** В заключение автор выражает благодарность участникам эксперимента  $\text{CMS}$  за сотрудничество и обсуждения при подготовке этой работы. Отдельно хотелось бы отметить М. В. Савину за внимательное прочтение рукописи и полезные замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *CMS Collab.* CMS Technical Design Report. V. II: Physics Performance // *J. Phys. G.* 2007. V. 34. P. 995.
2. *CMS Collab.* Search for a Standard Model-Like Higgs Boson in the  $\mu^+\mu^-$  and  $e^+e^-$  Decay Channels at the LHC // *Phys. Lett. B.* 2015. V. 744. P. 184.
3. Ланев А. В. Результаты коллаборации  $\text{CMS}$ : бозон Хиггса и поиски новой физики // *УФН.* 2014. Т. 184. С. 99;  
Ланев А. В. Последние результаты коллаборации  $\text{CMS}$  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  $\text{CMS}$  на  $\text{LHC}$  // Там же. С. 571;  
Шматов С. В. Поиск физики за рамками Стандартной модели во взаимодействии протонов при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ в эксперименте  $\text{CMS}$  на  $\text{LHC}$  // *ЯФ.* 2013. Т. 76. С. 1166;  
Шматов С. В. Обзор результатов эксперимента  $\text{CMS}$  // *ЯФ.* 2015. Т. 78. С. 546;  
Шматов С. В. Обзор результатов эксперимента  $\text{CMS}$  на  $\text{LHC}$  по поиску дополнительных пространственных измерений // *ЯФ.* 2016. Т. 79. С. 157;  
Шматов С. В. Обзор результатов эксперимента  $\text{CMS}$  // Тр. объединенного семинара  $\text{RDMS CMS}$  «Физика на  $\text{LHC}$ ». Дубна, 2016. Т. 4. С. 13.
4. Рубаков В. А. К открытию на Большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса // *УФН.* 2012. Т. 182. С. 1017;  
Казаков Д. И. Хиггсовский бозон открыт: что дальше? // *УФН.* 2014. Т. 184. С. 1004.
5. *CMS Collab.* Evidence for the 125 GeV Higgs Boson Decaying to a Pair of  $\tau$  Leptons // *JHEP.* 2014. V. 05. P. 104.

6. *CMS Collab.* Observation of the SM Scalar Boson Decaying to a Pair of  $\tau$  Leptons with the CMS Experiment at the LHC // *Phys. Lett. B.* 2018. V. 779. P. 283.
7. *Denner A., Heinemeyer S., Puljak I., Reubuzzi D., Spira M.* Standard Model Higgs-Boson Branching Ratios with Uncertainties // *Eur. Phys. J. C.* 2011. V. 71. P. 1753.
8. *Cahn R.N., Chanowitz M.S., Fleishon N.* Higgs Particle Production by  $Z$  to  $H$  Gamma // *Phys. Lett. B.* 1979. V. 82. P. 113;  
*Bergstrom L., Hulth G.* Induced Higgs Couplings to Neutral Bosons in  $e^+e^-$  Collisions // *Nucl. Phys. B.* 1985. V. 259. P. 137.
9. *CMS Collab.* Search for a Higgs Boson Decaying into a  $Z$  and a Photon in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV // *Phys. Lett. B.* 2013. V. 726. P. 587.
10. *CMS Collab.* Search for a Higgs Boson Decaying into  $\gamma^*\gamma \rightarrow l\gamma$  with Low Dilepton Mass in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV // *Phys. Lett. B.* 2016. V. 753. P. 341.
11. *CMS Collab.* Searches for Invisible Decays of the Higgs Boson in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 7, 8,$  and 13 TeV // *JHEP.* 2017. V. 02. P. 135.
12. *CMS Collab.* Search for Lepton-Flavour-Violating Decays of the Higgs Boson // *Phys. Lett. B.* 2015. V. 749. P. 337.
13. *CMS Collab.* Search for Lepton Flavour Violating Decays of the Higgs Boson to  $\mu\tau$  and  $e\tau$  in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // *JHEP.* 2018. V. 06. P. 001.
14. *CMS Collab.* Search for Lepton Flavour Violating Decays of the Higgs Boson to  $e\tau$  and  $e\mu$  in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV // *Phys. Lett. B.* 2016. V. 763. P. 472.
15. *ATLAS and CMS Collabs.* Measurements of the Higgs Boson Production and Decay Rates and Constraints on Its Couplings from a Combined ATLAS and CMS Analysis of the LHC  $pp$  Collision Data at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV // *JHEP.* 2016. V. 08. P. 45;  
*ATLAS and CMS Collabs.* Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 114. P. 191803.
16. *CMS Collab.* Search for Light Bosons in Decays of the 125 GeV Higgs Boson in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV // *JHEP.* 2017. V. 10. P. 076.
17. *CMS Collab.* A Search for Pair Production of New Light Bosons Decaying into Muons // *Phys. Lett. B.* 2016. V. 752. P. 146;  
*CMS Collab.* Search for Beyond Standard Model in Events with Two Leptons of Same Sign, Missing Transverse Momentum, and Jets in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // *Eur. Phys. J. C.* 2017. V. 77. P. 578.
18. *CMS Collab.* Summary Results of High Mass BSM Higgs Searches Using CMS Run-I Data. CMS-PAS-HIG-16-007.