

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ФИЗИКИ

имени А.И.Алиханова

на правах рукописи

НИКИТЕНКО АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

**ПОИСКИ ХИГГСОВСКИХ БОЗОНОВ
ВНЕ РАМОК СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ
НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ**

Специальность 01.04.23 - Физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

2019

Работа выполнена в ФГБУ Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты:

Казаков Дмитрий Игоревич

доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН,
директор Лаборатории теоретической
физики ОИЯИ

Образцов Владимир Федорович

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
начальник лаборатории НИЦ
«Курчатовский институт» - ИФВЭ

Федин Олег Львович

доктор физико-математических наук,
руководитель Отделения физики
высоких энергий НИЦ
«Курчатовский институт» - ПИЯФ

Ведущая организация:

НИИ ядерной физики МГУ

Защита состоится 10 декабря 2019 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 201.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ по адресу 117218, г. Москва, д. 25

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ и на сайте института www.iter.ru

Автореферат разослан 8 ноября 2019 года.

Учёный секретарь диссертационного совета

канд. физ.-мат. наук

В.В. Васильев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Стандартная Модель фундаментальных взаимодействий [1–3], дополненная Brout–Englert–Higgs механизмом возникновения масс калибровочных бозонов и фермионов [4–9], является хорошо установленной теорией, объясняющей большинство экспериментальных данных. Открытие на Большом Адронном Коллайдере (ЛHC) бозона Хиггса (h) [10–12] с массой 125 ГэВ [13, 14] и с характеристиками, совместимыми с предсказаниями Стандартной Модели [15, 16], стало завершающим триумфом этой модели. Одновременно это дало новый импульс поискам дополнительных бозонов Хиггса, предсказанных в различных моделях Новой Физики, а также поискам нестандартных распадов открытой частицы. Поиски процессов, не описываемых Стандартной Моделью, связаны с тем, что Стандартная Модель не отвечает на ряд фундаментальных вопросов [17]. Так, она не отвечает на вопрос о происхождении Темной Материи и асимметрии между барионной материей и антиматерией во Вселенной. Несмотря на свой поразительный успех в описании почти всех имеющихся экспериментальных данных, Стандартная Модель рассматривается как эффективная теория, работающая только на доступных в настоящее время энергиях меньше или порядка 1 ТэВ.

Поиски Новой Физики в Хиггсовском секторе можно проводить тремя способами:

- Искать дополнительные бозоны Хиггса. В моделях Суперсимметрии таких как Минимальная Суперсимметричная Модель (MSSM) [18] существует четыре бозона Хиггса, три нейтральных (два CP-четных h и H , и CP-нечетный A) и один заряженный $H^\pm$. NMSSM [19] предсказывает существование шести бозонов Хиггса, трёх CP-четных (h_1, h_2, h_3), двух CP-нечетных (a_1, a_2) и одного заряженного $h^\pm$. Хиггсовский сектор в несуперсимметричных моделях, Двух Дублетной (2HDM) [20] и 2HDM+S [21], такой же как в MSSM, и соответственно, в NMSSM.

- Искать моды распада h -бозона, отсутствующие в Стандартной Модели. Измерения h -бозона в стандартных модах допускают существование около 30% нестандартных мод распадов [15, 16].
- Измерять как можно более точно константы связи h -бозона с частицами Стандартной Модели, чтобы заметить расхождение измеренных значений с предсказаниями Стандартной Модели [22–24]. Интерпретация может быть сделана в рамках Эффективной Теории Поля [25].

В диссертации представлены поиски Новой Физики в Хиггсовском секторе, которые проводились на LHC на установке CMS при энергиях протон-протонных столкновений 7, 8 и 13 ТэВ. Были проведены поиски дополнительных бозонов Хиггса с массами как больше, так и меньше массы h -бозона 125 ГэВ в модах распада $\mu\mu$, $\tau\tau$, hh для нейтральных бозонов и $\tau^\pm\nu$ (для заряженного бозона). Также искали моды распада h -бозона, $h \rightarrow \phi_1\phi_1$ (ϕ_1 обозначает легкий псевдоскалярный или скалярный бозон Хиггса) и $h \rightarrow invisible$ (невидимая мода распада на частицы Темной Материи). Энергии и интенсивности протон-протонных взаимодействий, доступные на LHC, позволили существенно расширить область поиска в пространстве параметров рассматриваемых моделей по сравнению с предыдущими экспериментами на LEP [26–32] и Tevatron [33–35]. Целью работы было обнаружение дополнительных бозонов Хиггса и нестандартных распадов h -бозона. В случае необнаружения, задачей было измерение верхних пределов на сечение исследуемых процессов.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы было обнаружение дополнительных бозонов Хиггса и нестандартных распадов h -бозона на установке CMS на Большом Адронном Коллайдере с использованием событий протон-протонных соударений, набранных за период с 2010 по 2018 годы при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ. В случае необнаружения, задачей было измерение верхних пределов на сечение исследуемых процессов.

Научная новизна. Впервые проведён поиск дополнительных бозонов Хиггса в широком интервале масс, недоступном на предыдущих экспериментах на LEP и Tevatron. Открытие бозона Хиггса h с массой 125 ГэВ на LHC позволило впервые провести поиск его нестандартных распадов.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты, полученные в диссертации, существенно ограничили пространство сво-

бодных параметров в моделях Новой Физики. Это позволило скорректировать программу дальнейших поисков дополнительных бозонов Хиггса и нестандартных распадов h -бозона при энергии 14 ТэВ и большей светимости (HL-LHC). Методы отбора событий, измерения фона и выделения потенциального сигнала, разработанные в диссертации, будут применены для дальнейших поисков на HL-LHC.

Положения, выносимые на защиту. Следующие результаты представлены к защите:

- Измерение верхнего предела на сечения процессов $gg \rightarrow \phi$ и $gg \rightarrow b\bar{b}\phi$, где ϕ узкий скалярный резонанс с массой от 90 ГэВ до 3.2 ТэВ, распадающийся на пару τ -лептонов. Интерпретация результатов в сценариях MSSM [36] и в hMSSM [37–39] с использованием теоретических сечений, предоставляемых LHC Higgs Cross Section Working Group [24].
- Измерение верхнего предела на сечения процесса $t \rightarrow H^\pm b$ с распадом $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu$ в интервале масс заряженного бозона Хиггса 80–160 ГэВ. Интерпретация результатов в сценариях MSSM [36] с использованием теоретических сечений, предоставляемых LHC Higgs Cross Section Working Group [24].
- Измерение верхнего предела на сечение рождения тяжелого бозона Хиггса H в интервале масс 260–350 ГэВ и его распада на два бозона Хиггса h с массой 125 ГэВ в $\tau\tau b\bar{b}$ конечном состоянии: $pp \rightarrow H \rightarrow hh \rightarrow \tau\tau b\bar{b}$. Интерпретация результатов в сценарии MSSM при малых значениях $\tan\beta$ [40] с использованием теоретических сечений, предоставляемых LHC Higgs Cross Section Working Group [24].
- Измерение верхнего предела на сечение процесса $pp \rightarrow b\bar{b}A$, $A \rightarrow \mu\mu$ в интервале масс A -бозона 25–60 ГэВ. Сравнение результатов с предсказаниями "wrong-sign Yukawa coupling" сценария [41, 42] в модели 2HDM.
- Измерение верхнего предела на сечение процесса $gg \rightarrow h \rightarrow \phi_1\phi_1 \rightarrow \tau\tau\tau\tau$, где ϕ_1 есть легкий псевдоскалярный или скалярный бозон Хиггса в интервале масс 4–8 ГэВ.
- Измерение верхнего предела вероятности распада $h \rightarrow invisible$, с использованием $VV \rightarrow h$ ($V = Z, W$) процесса рождения h -бозона. Интерпретация результатов в Higgs-portal Dark Matter модели [43, 44].

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается тем, что результаты, представленные в диссертации, подтверждены в независимых измерениях, выполненных в ATLAS эксперименте на LHC.

Результаты докладывались автором на международных конференциях "LHC Days in Split-2018", "LHC Days in Split-2016", "LHC Days in Split-2014", "SUSY-2014", "RoyalSoc-2014", "Iran-Turkey Joint Conference on LHC Physics-2017", "Iran-Turkey Joint Conference on LHC Physics-2015".

Они также регулярно докладывались автором на международных Workshops "Higgs Days in Santander", "Physics at TeV colliders", на Workshops "Hamburg Higgs-2014" и "IPMLHC2013" (Iran).

Автор докладывал и обсуждал результаты на Семинарах в RAL (UK), Pavia University (Italy), IPPP (Durham, UK), DESY (Germany), в The Cosener's House, Abingdon (UK).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в работах [45–57]. Все статьи опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК.

Личный вклад автора. Первые экспериментальные работы CMS по поиску распадов $\phi \rightarrow \tau\tau$ и $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu$ при энергии LHC 7 ТэВ и распадов $h \rightarrow \text{invisible}$ и $h \rightarrow \phi_1 \phi_1 \rightarrow \tau\tau\tau\tau$ при энергии 8 ТэВ были инициированы и осуществлялись под руководством автора как координатора первых CMS Higgs-Tau и Higgs-Exotica групп. Методика отбора событий, извлечение возможного сигнала из данных, оценка фона и теоретическая интерпретация результатов были затем применены для анализа данных при энергиях 8 и 13 ТэВ, где автор также принимал активное участие. Работа по поиску распада $H \rightarrow hh \rightarrow \tau\tau b\bar{b}$ была инициирована автором, и автор вместе с группой Imperial College (London) участвовал в оптимизации отбора событий и теоретической интерпретации полученных результатов. Поиск легкого бозона Хиггса в канале $pp \rightarrow b\bar{b}A$, $A \rightarrow \mu\mu$ на детекторе CMS был предложен автором и проводился совместно с О.Л. Кодоловой (НИЯФ МГУ) и В.Б. Гавриловым (ИТЭФ).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, основной части (девять глав), Заключение, благодарностей и списка литературы. Общий объем диссертации 145 страниц, включая 65 рисунков, 17 таблиц. Список литературы содержит 330 наименований.

Содержание работы

Во Введении (Глава 1) дается краткая характеристика исследований. Обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цели, ставятся задачи работы, излагаются научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В Главе 2 даётся краткий теоретико-феноменологический обзор процессов, поиск которых представлен в диссертации. Представлены такие модели, как MSSM, hMSSM, NMSSM, 2HDM, Higgs-portal Dark Matter.

Глава 3 кратко описывает CMS детектор. CMS детектор показан на Рис.1. Поперечный разрез детектора в плоскости X-Y показан на Рис.2.

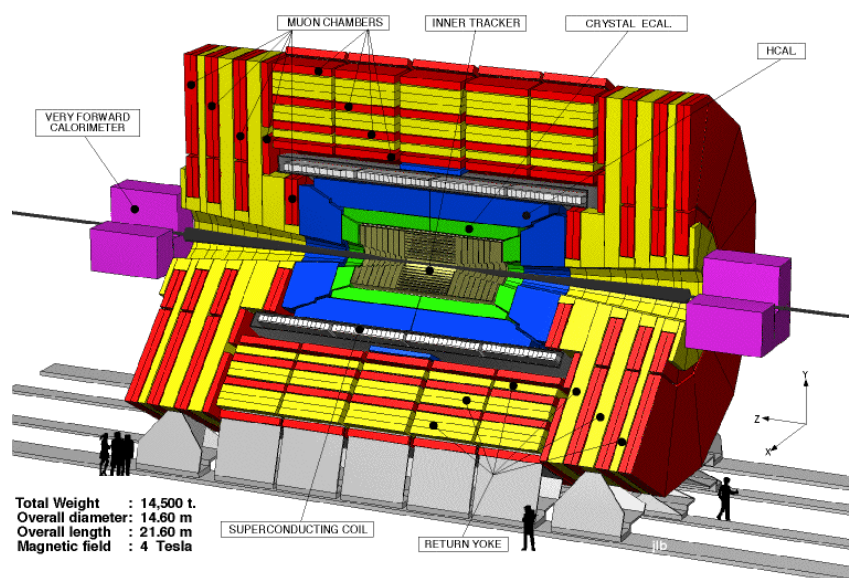


Рис. 1: CMS детектор.

Основная часть детектора CMS, которая определяет всю концепцию геометрии, это сверхпроводящий соленоид 13 метров в длину и 6 метров в диаметре, который даёт аксиальное магнитное поле 3.8 Тесла. В объёме, занимаемом магнитным полем внутри соленоида, расположены различные системы регистрации частиц. Траектории заряженных частиц измеряются силиконовыми пиксельным и стриповым детекторами (трекер), покрывающими $0 \leq \phi \leq 2\pi$ по азимуту и $|\eta| < 2.5$ по псевдо-быстроте. Трекерный объём окружает электромагнитный калориметер (ECAL), сделанный из кристаллов вольфрама свинца. Он состоит из центральной области $|\eta| < 1.48$ и двух передних обла-

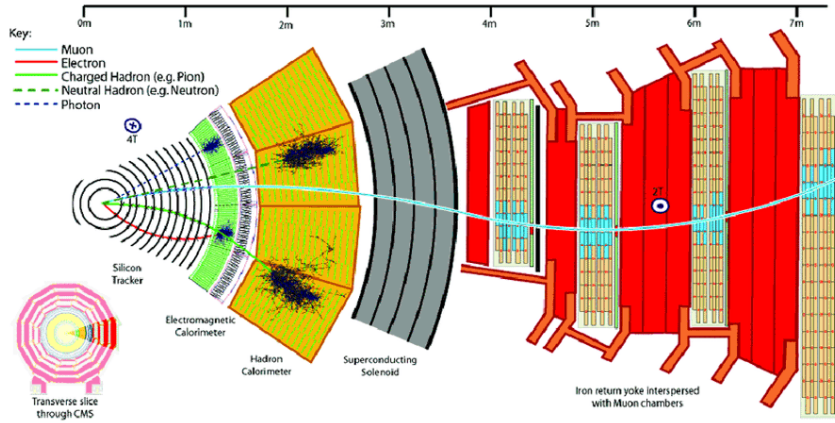


Рис. 2: Поперечный разрез CMS детектора в плоскости X-Y.

стей, достигающих $|\eta| = 3$. Свинцовый и силиконово-стриповый детекторы (preshower) расположены перед передними частями электромагнитного калориметра. Медный и сцинтилляционный адронный калориметер окружает ECAL и покрывает область $|\eta| < 3$. Стальной передний калориметер с кварцевыми фиберами, считываемыми фотоумножителями, расширяет калориметрическую систему до $|\eta| = 5$. Мюоны идентифицируются в газовой-ионизационных детекторах, вставленных в стальное ярмо снаружи магнитного соленоида. Мюонный детектор почти герметичен, что позволяет проводить измерение баланса энергии в плоскости, перпендикулярной направлению пучков.

В Главе 4 представлен поиск заряженного бозона Хиггса, распадающегося на τ -лептон и нейтрино. Использовались данные при энергии LHC 7 TeV ($\simeq 2 \text{ fb}^{-1}$), 8 TeV ($\simeq 20 \text{ fb}^{-1}$) и 13 TeV ($\simeq 36 \text{ fb}^{-1}$).

Для первого анализа при энергии 7 TeV [47] были разработаны оригинальные методы оценки доминирующих фонов с использованием данных. В частности, для оценки фона от парного и одиночного рождения топ-кварка использовались события с мюоном вместо τ -лептона в конечном состоянии, и мюон был затем заменён смоделированным τ -лептоном. Фон от многоструйных событий оценивался с использованием многоструйных событий с такими же отборами, как и для отбора сигнала, но без применения изоляции для идентификации адронных распадов τ -лептона. К этим событиям применялась вероятность изоляции, измеренная по многоструйным событиям, с другими критериями отбора на недостающую поперечную энергию и угол между поперечным импульсом τ и недостающей энергией. Эти методы были затем использованы при анализе данных при энергиях 8 и

13 ТэВ.

В результате анализа данных при энергии 7 ТэВ был измерен верхний предел на вероятность распада $t \rightarrow bH^\pm$ с последующим распадом $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$ в интервале масс заряженного бозона 80-160 ГэВ, $\mathcal{B}(t \rightarrow bH^\pm)\mathcal{B}(H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau)$ от 4 до 2%, соответственно.

Увеличение энергии ЛHC и интегральной светимости позволило существенно улучшить верхний предел на $\mathcal{B}(t \rightarrow bH^\pm)\mathcal{B}(H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau)$ и начать исследовать область более высоких масс заряженного бозона Хиггса. Так, при энергии 8 ТэВ предел на $\mathcal{B}(t \rightarrow bH^\pm)\mathcal{B}(H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau)$ уже понизился до 1.2-0.15% в интервале масс 80-160 ГэВ, и был измерен верхний предел на сечение $\sigma_{H^\pm}\mathcal{B}(H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau) = 0.38-0.025$ pb в области масс, соответственно 180-600 ГэВ [48]. Анализ данных при энергии ЛHC 13 ТэВ [49] поставил ещё более сильные ограничения на $\mathcal{B}(t \rightarrow bH^\pm)\mathcal{B}(H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau) = 0.36-0.08\%$ в массовом диапазоне 80-160 ГэВ и расширил область измерения сечения $\sigma_{H^\pm}\mathcal{B}(H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau)$ до массы 3 ТэВ. Был также измерен верхний предел на сечение $\sigma_{H^\pm}\mathcal{B}(H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau)$ в области промежуточных масс 165-175 ГэВ. Для всех анализов была проведена интерпретация результатов в рамках модели MSSM и сделано заключение, что заряженный бозон Хиггса с массой меньше 160 ГэВ исключен в этой модели.

На Рис.3 слева показан верхний предел на $\sigma_{H^\pm}\mathcal{B}(H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau)$, измеренный при энергии ЛHC 13 ТэВ для интегральной светимости $\simeq 36$ fb $^{-1}$. На том же рисунке справа показана интерпретация результатов измерений в модели MSSM в плоскости параметров $m_{H^\pm}-\tan \beta$.

В Главе 5 описан поиск распада на пару τ -лептонов дополнительного, нейтрального бозона Хиггса (скалярного или псевдоскалярного) с массой от 90 ГэВ до 3.2 ТэВ. Такой бозон предсказывается, например, в модели MSSM, где он рождается при взаимодействии двух глюонов или в сопровождении двух bottom-кварков. Анализировались данные при энергии ЛHC 7 ТэВ (36 pb $^{-1}$), 8 ТэВ (20 fb $^{-1}$) и 13 ТэВ (36 fb $^{-1}$).

В первом анализе при энергии 7 ТэВ [50] были разработаны методы отбора событий и определения фонов, которые потом использовались при анализах с данными, набранными при энергии 8 и 13 ТэВ. Так, доминирующий фон от распада Z -бозона на два τ -лептона был оценен с использованием событий распада Z -бозона на два мюона, в которых мюоны были заменены смоделированными τ -лептонами. Это позволило уменьшить систематические ошибки, связанные с отборами на

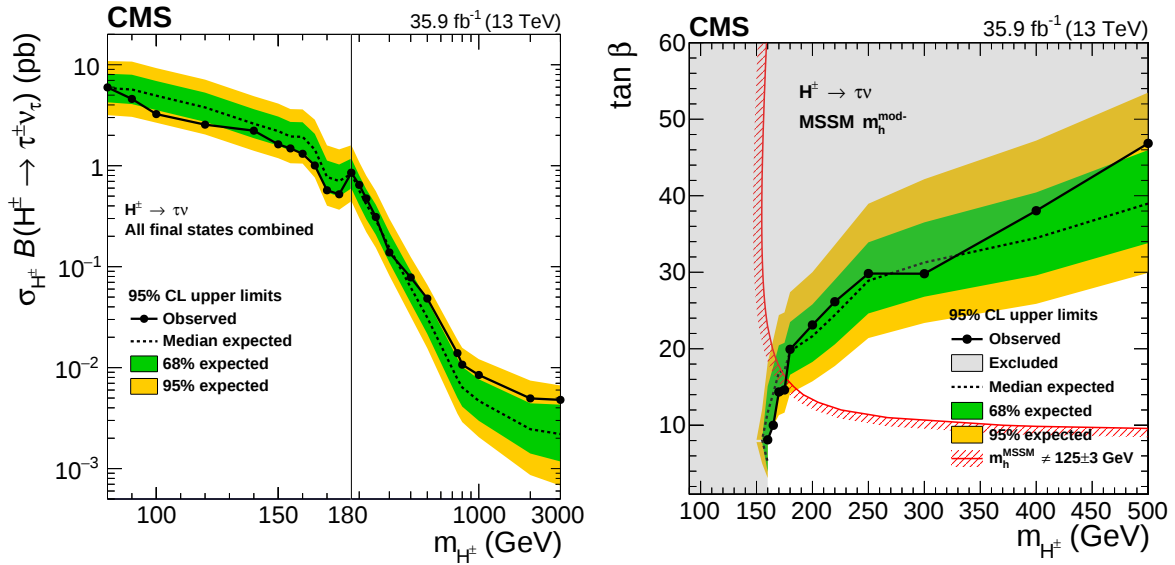


Рис. 3: Наблюдаемое на 95% уровне достоверности ограничение на $\sigma_{H^\pm} \mathcal{B}(H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau)$ (обозначено черными точками) сравнивается с ожидаемым в предположении только процессов Стандартной Модели (пунктирная линия) для диапазона масс $H^\pm$ от 80 GeV до 3 TeV (слева), и то же ограничение интерпретировано в плоскости MSSM параметров $m_{H^\pm} - \tan \beta$ для MSSM $m_h^{\text{mod-}}$ сценария (справа). Зеленым (желтым) отмечено одно (два) стандартных отклонения от ожидаемой величины. Слева - горизонтальная ось имеет линейный масштаб в интервале 80 до 180 ГэВ и логарифмический для величин больше $m_{H^\pm}$. Справа - область ниже красной линии исключена в предположении, что наблюдаемый нейтральный бозон Хиггса - это легкий CP-четный бозон Хиггса с массой 125 ± 3 GeV, где погрешность - это теоретическая погрешность в расчете массы.

адронные струи и недостающую поперечную энергию. Фон от многоструйных событий в конечное состояние с электроном или мюоном и τ -струей определялся из данных, в которых лептон и τ -струя имеют одинаковый знак заряда и требование на изоляцию лептона не такое сильное, как для отбора сигнала. По этим событиям измерялась форма эффективной массы двух τ -лептонов в сигнальной области. Для нормировки использовалось число событий с одинаковым зарядом лептона и τ -струй в сигнальной области и отношение чисел событий с одинаковым и разным зарядом и неизолированным лептоном. Фон от рождения W -бозона в сопровождении адронных струй определялся в контрольной области с большой недостающей энергией и пропигировался в сигнальную область с использованием моделирования.

При анализе данных на 8 и 13 ТэВ [51, 52] были добавлены события с двумя τ -струями. Это сильно увеличило чувствительность поиска в области больших масс. Фон от многоструйных событий для этой категории также определялся из данных с использованием событий с менее сильной изоляцией двух τ -струй разного знака. Чувствительность поиска при энергиях 8 и 13 ТэВ была также увеличена разделением событий на две категории - с присутствием b -струи и без b -струи.

При анализе 13 ТэВ данных было использовано next-to-leading order моделирование сигнала, в результате чего было отменено veto дополнительных адронных струй в событии, поскольку, как показало моделирование, оно сильно уменьшает эффективность отбора сигнала. Увеличение энергии ЛНС с 7 ТэВ до 8 и затем до 13 ТэВ и увеличение интегральной светимости позволило существенно расширить область масс для поиска дополнительного бозона Хиггса. Так, если при энергии 7 ТэВ исследуемый интервал масс был 90-500 ГэВ, то при энергии 8 ТэВ он расширился до 1000 ТэВ, а при энергии 13 ТэВ стал 90-3200 ГэВ. Были поставлены следующие верхние пределы на сечение рождения одиночного, узкого резонанса и его распада на пару τ -лептонов. Для рождения при столкновении двух глюонов верхние пределы составляют 18 pb при массе 90 ГэВ и 3.5 fb при массе 3.2 ТэВ. Для рождения с двумя b -кварками - это 15 pb для массы 90 ГэВ и 2.5 fb - для массы 3.2 ТэВ. Анализ результатов был также проведён в рамках модели MSSM. Была определена область в двумерной плоскости параметров m_A - $\tan \beta$, исключенная в результате измерений.

На Рис.4 показаны верхние пределы на сечение рождения одиночного, узкого резонанса в процессе $gg \rightarrow \phi$ (слева) и в процессе $b\bar{b}\phi$ (справа) и его распада на пару τ -лептонов, измеренные при энергии ЛHC 13 ТэВ для интегральной светимости $\simeq 36 \text{ fb}^{-1}$. На Рис.5 показана интерпретация результатов измерений в модели MSSM в сценарии $m_h^{\text{mod}+}$ (слева) и в модели hMSSM (справа) в плоскости параметров m_A - $\tan \beta$.

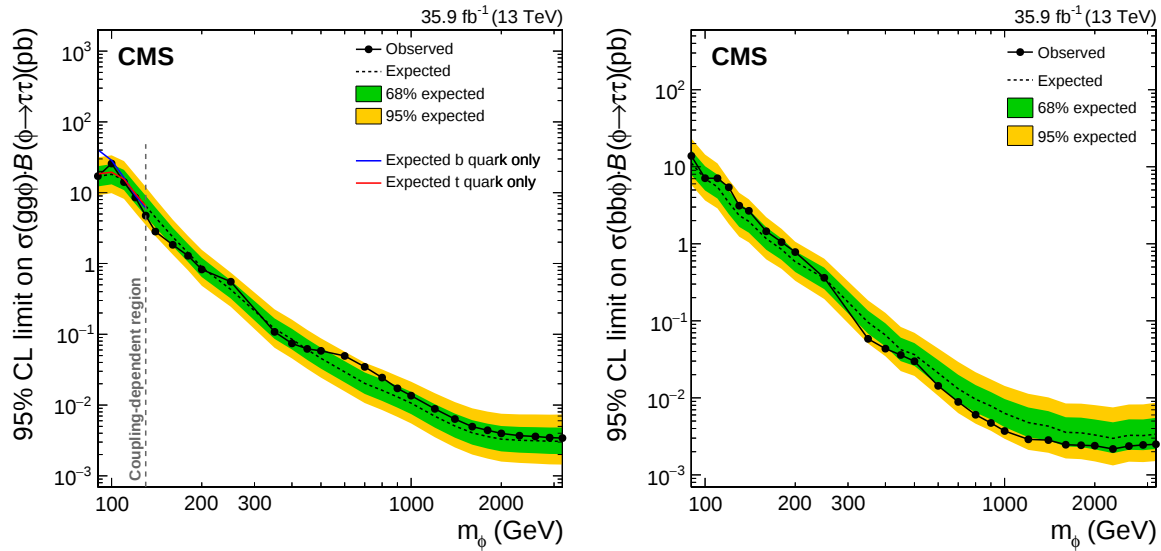


Рис. 4: Ожидаемые и наблюдаемые верхние пределы (на 95% уровне достоверности) для сечения рождения одиночного узкого резонанса, ϕ , с массой между 90 ГэВ и 3.2 ТэВ в конечном состоянии $\tau\tau$ (слева) через слияние глюонов ($gg\phi$) и (справа) в ассоциации с b кварками ($b\bar{b}\phi$). Ожидаемая медиана предела исключения показана пунктирной линией. Темно-зеленая и яркая желтая полосы указывают на 68 и 95% доверительные интервалы для ожидаемого предела исключения. Черные точки соответствуют наблюдаемым пределам. В левой панели – ожидаемые пределы исключения для тех случаев, когда (синяя непрерывная линия) только b -кварк и (красная непрерывная линия) только top -кварк учитываются в фермионной петле. Слева от пунктирной вертикальной линии два разных предположения приводят к видимым различиям в ожидаемых пределах исключения.

В Главе 6 представлен поиск распада тяжелого нейтрального бозона Хиггса, который распадается на два h -бозона с массой 125 ГэВ каждый [53]. Был исследован массовый интервал между двумя массами h -бозона и двумя массами top -кварка. Нижняя граница интервала является кинематической границей распада. Для массы выше массы двух top -кварков доминирующей модой распада в MSSM является распад на два top -кварка.

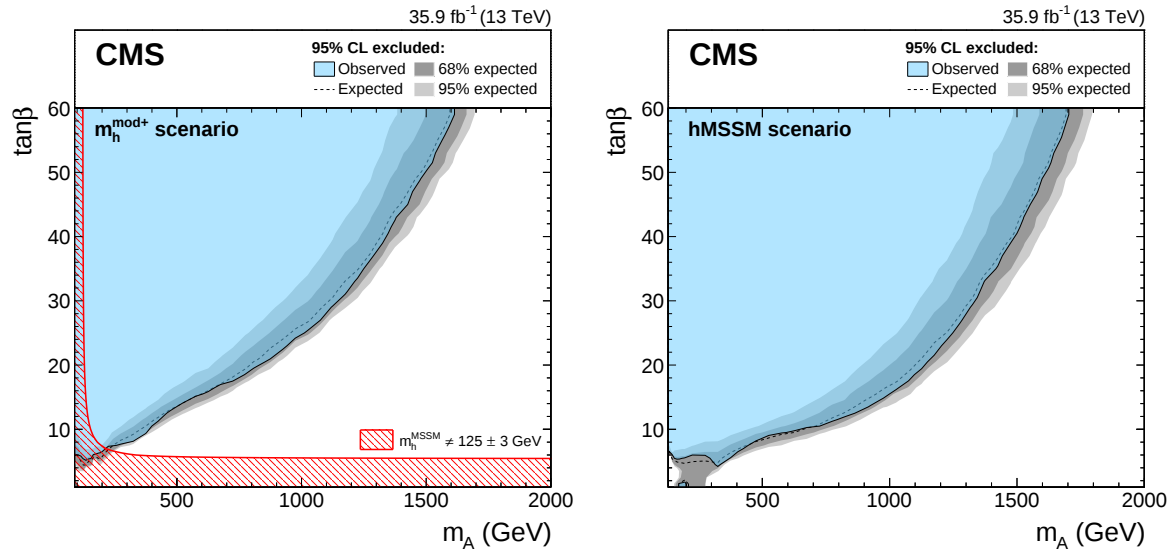


Рис. 5: Наблюдаемые и ожидаемые на 95% уровне достоверности исключённые области (слева) в MSSM $m_h^{\text{mod}+}$ сценарии и (справа) в сценарии hMSSM. Ожидаемая медиана показана пунктирной черной линией. Темная и ярко-серая полосы указывают 68 и 95% доверительные интервалы для ожидаемого исключения. Наблюдаемая исключённая область обозначается синим цветом. Для сценария $m_h^{\text{mod}+}$ те части пространства параметров, где m_h отклоняется более чем на ± 3 ГэВ от массы наблюдаемого бозона Хиггса 125 ГэВ, обозначены красной штриховкой.

Искались конечные состояния, в которых один h -бозон распадается на два τ -лептона, а второй h -бозон распадается на два b -кварка. При этом два τ -лептона отбирались в конечных состояниях с мюоном и τ -струей, электроном и τ -струей и с двумя τ -струями. В событиях требовалось присутствие по крайней мере двух адронных струй. События разделялись на группы с двумя таггированными b -струями, одной b -струей или без b -струй, что увеличивает чувствительность поиска. Доминирующими фонами являются Z -бозон, рождающийся в ассоциации с адронными струями, парное рождение топ-кварков, рождение W -бозона со струями и многоструйные события. Фон от парного рождения топ-кварков определялся из моделирования и был проверен по данным с электроном и мюоном и b -струями. Остальные фоны определялись из данных с использованием тех же методов, что применялись в поиске распада, описанного в пятой главе. При поисках сигнала отбирались события, в которых эффективная масса двух τ -лептонов и масса двух струй была близка к массе h -бозона 125 ГэВ. Сигнал определялся в распределении по массе четырёх частиц - двух τ -лептонов и двух струй. При анализе использовались данные при энергии 8 ТэВ ($\simeq 20 \text{ fb}^{-1}$).

Был измерен верхний предел на сечение процесса и проведена интерпретация в рамках так называемого "low $\tan \beta$ " сценария MSSM [40]. Область исключённых значений $m_A - \tan \beta$ в таком сценарии для комбинации измерений $H \rightarrow hh \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ и $A \rightarrow Zh \rightarrow \ell\ell\tau\tau$ [53] показана на Рис.6. Исключённые значения ограничиваются массой $m_A \simeq 350$ ГэВ, так как выше этой массы становится кинематически разрешен распад A на два топ-кварка.

Глава 7 суммирует интерпретацию в рамках модели MSSM результатов по поиску дополнительных бозонов Хиггса, представленных в главах 4, 5 и 6. Со времени открытия h -бозона возник следующий вопрос - какой из двух скалярных бозонов в MSSM открыт, little h -бозон или capital H -бозон? Ответ на этот вопрос дали результаты поиска заряженного бозона Хиггса $H^\pm$ в моде распада $\tau\nu$, представленные в диссертации. Результаты показали, что заряженный бозон Хиггса с массой меньше 160 ГэВ исключен при всех значениях $\tan \beta$. Из связи масс заряженного бозона и псевдоскалярного нейтрального бозона следует, что псевдоскалярный бозон с массой ≤ 140 ГэВ также исключён. Тогда из этого следует, что открытый бозон Хиггса с массой 125 ГэВ является little h -бозоном. Осталась только очень малая область MSSM параметров в сценарии M_H^{125} [58], в которой открытый бозон Хиггса является capital H -бозоном. Измерения h -бозона [15, 16]

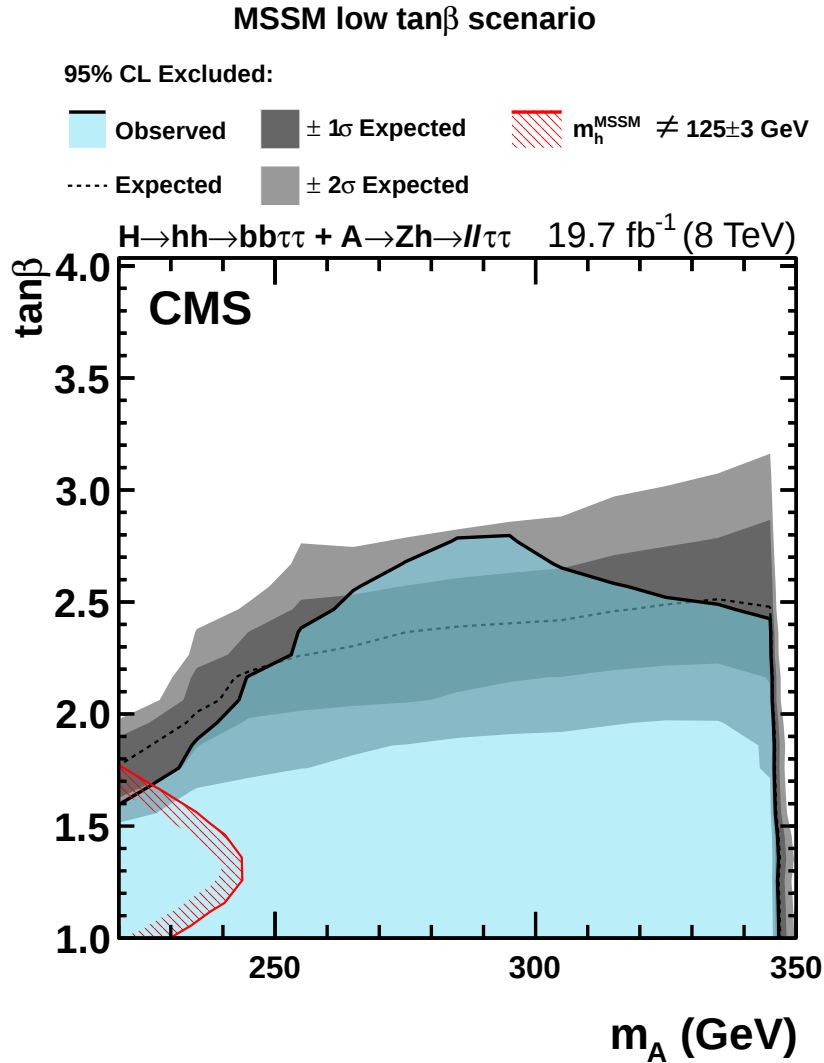


Рис. 6: Область исключения на уровне достоверности 95% для значений m_A - $\tan\beta$ в "low $\tan\beta$ " сценарии MSSM [40] для комбинации измерений $H \rightarrow hh \rightarrow bb\tau\tau$ и $A \rightarrow Zh \rightarrow \ell\ell\tau\tau$ каналов. Область, показанная голубым цветом, исключена по результатам данного анализа. Штриховая линия и серые области показывают ожидаемые пределы по исключению с относительной неопределенностью $\pm 1\sigma$ и $\pm 2\sigma$. Область, обозначенная красными линиями в нижнем левом углу, показывает область, которая исключена известной массой h -бозона – 125 ГэВ. Исключённые значения ограничиваются массой $m_A \simeq 350$ ГэВ, так как выше этой массы становится кинематически разрешен распад A на два топ-кварка.

позволяют сильно ограничить область параметров MSSM в предположении, что он является little h-бозоном. Так, в соответствии с измерениями, масса псевдоскалярного бозона A должна быть больше чем $\simeq 500$ ГэВ при всех значениях $\tan\beta$. Для дальнейших поисков дополнительных бозонов Хиггса в MSSM на HL-LHC это означает, что надо продолжать поиски тяжелого нейтрального бозона Хиггса, распадающегося на пару τ -лептонов. Необходимо начать поиски распадов тяжелого бозона Хиггса на пару топ-кварков (ATLAS уже опубликовал такой анализ при 8 ТэВ) и распадов на суперсимметричные частицы.

В Главе 8 представлен поиск распада лёгкого бозона Хиггса в интервале масс 25-60 ГэВ, рождающегося в сопровождении двух b -кварков и распадающегося на пару мюонов. Этот процесс имеет большие сечения в модели 2HDM в сценарии, когда константа связи псевдоскалярного бозона с b -кварками меняет знак по сравнению со знаком в Стандартной Модели (Wrong Sign Yukawa Coupling scenario). Несмотря на то, что распад в два τ -лептона имеет гораздо большую вероятность, распад в два мюона имеет ряд преимуществ с экспериментальной точки зрения. Так, разрешение по массе двух лептонов гораздо выше в мюонной моде. Также, двухмюонная мода распада имеет существенно большую эффективность триггера и лептонной идентификации.

В представленном анализе [54] использовались данные ($\simeq 20 \text{ fb}^{-1}$) при энергии LHC 8 ТэВ. Отбирались события с двумя мюонами и по крайней мере одной b -таггированной струей. Для подавления фона от парного рождения топ-кварков требовалось, чтобы в событиях была малая недостающая энергия. Фон от парного рождения топ-кварков и процесса Drell-Yan со струями определялся из моделирования и был проверен в контрольных областях двухмюонной массы 12-25 ГэВ и 60-70 ГэВ. Также сравнивалось распределение двухэлектронной массы между данными и моделированием для событий с теми же критериями отборов, но с двумя электронами вместо мюонов. Сравнивались результаты с использованием двух альтернативных алгоритмов регистрации и измерения адронных струй.

Как результат, измерен верхний предел на сечение исследуемого процесса $\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}A) \mathcal{B}(A \rightarrow \mu\mu)$, который оказался сравнимым с результатом по τ -лептонной моде. Проведено сравнение верхнего предела на сечение с предсказаниями Wrong Sign Yukawa Coupling сценария модели 2HDM и сделано заключение, что этот сценарий ис-

ключен для масс псевдоскалярного бозона в исследуемом интервале 25-60 ГэВ.

На Рис.7 показан верхний предел на сечение $\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}A) \mathcal{B}(A \rightarrow \mu\mu)$ как функция m_A , измеренный при энергии LHC 8 ТэВ для интегральной светимости $\simeq 20 \text{ fb}^{-1}$.

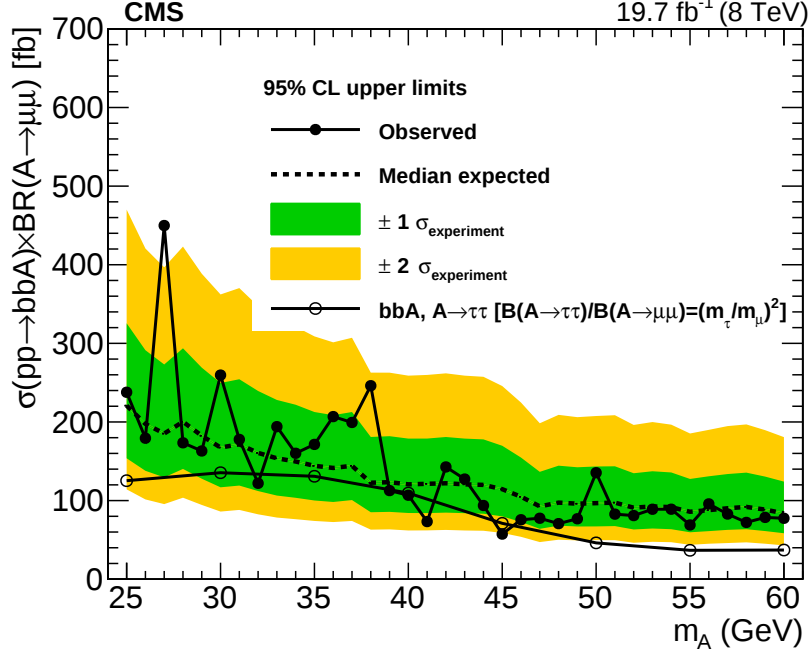


Рис. 7: ожидаемый и измеренный верхние пределы на уровне достоверности 95% для $\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}A) \mathcal{B}(A \rightarrow \mu\mu)$ как функция m_A . Пустыми кружками показаны пределы, полученные в анализе CMS конечного состояния $A \rightarrow \tau\tau$ [59], переведенные в пределы на конечное состояние $A \rightarrow \mu\mu$

Глава 9 описывает поиск нестандартного распада h -бозона на два лёгких скалярных или псевдоскалярных нейтральных бозона [55]. Такой распад возможен, например, в модели NMSSM или 2HDM. Искались распады, в которых каждый из легких бозонов распадается на пару τ -лептонов. Такое конечное состояние имеет большую вероятность, если масса легкого бозона находится в интервале между двумя массами τ -лептона и двумя массами b -кварка. Нижняя граница обусловлена кинематикой. Выше верхней границы массы доминирует распад на два b -кварка. Результаты получены в интервале масс 4-8 ГэВ.

Отбиралась топология, в которой один τ -лептон распадается на мюон и пару нейтрино, а второй τ -лептон (из распада того же бозона) даёт один трек в конечном состоянии (электрон, мюон или пион) и любое количество нейтральных пионов. Поскольку масса бозона ма-

ла по сравнению с массой 125 ГэВ, мюон и трек почти коллинеарны друг другу. При этом две мюон-трек пары разделены на большие углы между собой. Такая топология отбиралась по наличию в событии двух мюон-трек пар, разделённых по азимутальному углу. При этом в каждой паре мюон и трек должны быть разных знаков и мюон-трек пары должны быть изолированными от присутствия других треков. Требовалось, чтобы мюоны из двух пар имели одинаковый знак. При таких отборах вклад фона от событий Drell-Yan, топ-кварк парного рождения и парного рождения Z и W -бозонов становится пренебрежимо малым. Единственным фоном остаётся многоструйное рождение при доминирующем процессе рождения b -кварк пар. Сигнал определялся из фита двумерного распределения по массе мюон-трек пар. При этом форма фона измерялась из данных с использованием событий, в которых одна мюон-трек пара неизолирована.

Как результат, измерены верхние пределы на сечение процесса с распадом h -бозона на два легких бозона, каждый из которых распадается на пару τ -лептонов. Представлено сравнение измерений с теоретическими расчетами в моделях MSSM и 2HDM, выполненными группой Stefano Moretti.

На Рис.8 показано значение верхнего предела на $(\sigma\mathcal{B})_{\text{sig}}$ на уровне достоверности 95% вместе с ожидаемыми пределами в рамках нулевой гипотезы для значений m_{ϕ_1} в диапазоне от 4 до 8 ГэВ.

В Главе 10 представлен поиск распада h -бозона в невидимой моде на частицы "Тёмной Материи"(Dark Matter). Такая мода распада существует в так называемой Higgs-portal Dark Matter модели, в моделях MSSM и NMSSM. Отбирались события процесса рождения h -бозона при взаимодействии векторных бозонов Z и W (VBF) как наиболее чувствительного процесса к поиску этой моды распада.

В событиях требовалось присутствие двух адронных струй, разделённых большим интервалом по полярному углу, и с большой эффективной массой двух струй. Чтобы эффективно подавить фон от многоструйных событий, отбирались события с большой недостающей энергией и малым азимутальным углом между струями. Дополнительно применялось вето событий со струями в центральной части детектора (CJV), что подавляло фон от рождения Z и W -бозонов со струями.

Фон от Z -бозонов определялся из данных с использованием двухмюонных распадов Z -бозона с теми же критериями отбора на струи и

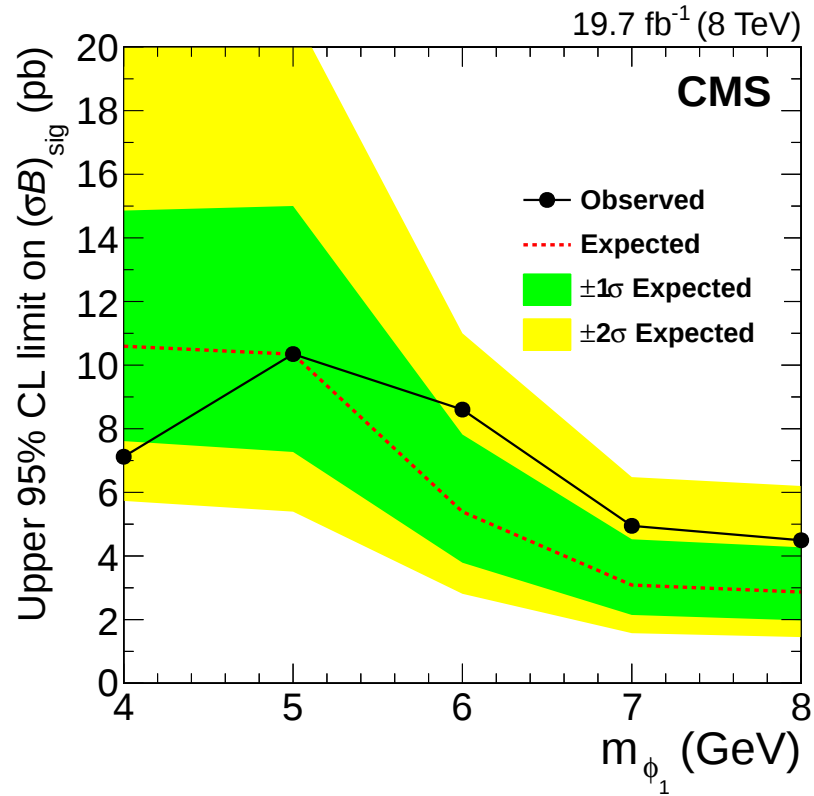


Рис. 8: Наблюдаемые и ожидаемые верхние пределы на $(\sigma\mathcal{B})_{\text{sig}}$ в pb на уровне достоверности 95% в зависимости от m_{ϕ_1} . Полосами отмечены ожидаемые доверительные интервалы $\pm 1\sigma$ и $\pm 2\sigma$ относительно ожидаемого предела.

недостающую энергию, что и при отборе сигнала. Моделирование использовалось для пересчета событий в контрольной области фона к числу событий в сигнальной области. Фон от W -бозона определялся тем же методом с использованием распадов W -бозона на лептон и нейтрино, в которых лептон был зарегистрирован в установке. Фон от многоструйных событий определялся из данных так называемым ABCD методом с критериями отбора по недостающей энергии и CJV.

Были проанализированы данные ($\simeq 20 \text{ fb}^{-1}$) при энергии LHC 8 ТэВ и поставлен верхний предел на вероятность распада 0.65 на 95% уровне достоверности [56]. В комбинации с анализом, использующим ассоциированное рождение h -бозона с Z -бозоном верхний предел составил 0.58. Анализ был продолжен с данными при энергии LHC 13 ТэВ ($\simeq 36 \text{ fb}^{-1}$) и верхний предел был улучшен: 0.35 для VBF рождения и 0.26 для комбинации с Zh и $gg \rightarrow h$ процессами [57]. Комбинация всех энергий и процессов рождения дала верхний предел 0.19 на 95 % уровне достоверности.

Была проведена интерпретация полученного результата в модели Higgs-portal Dark Matter и проведено сравнение с результатами, полученными на подземных экспериментах. Из сравнения ясно, что поиски Dark Matter на LHC в распаде h -бозона более чувствительны, чем в подземных экспериментах при массе Dark Matter частиц меньше 10-20 ТэВ.

Рис.9 (слева) показывает верхний предел на branching fraction распада $h \rightarrow invisible$ для различных процессов рождения h -бозона, в которых искался этот распад, а также результат для комбинации всех этих процессов рождения при энергии LHC 13 ТэВ и интегральной светимости $\simeq 36 \text{ fb}^{-1}$. Справа на рисунке показана эволюция измерения с увеличением энергии LHC и верхний предел по комбинации всех энергий и процессов рождения, в которых искался этот распад.

Рис.10 показывает интерпретацию измеренного верхнего предела на branching fraction распада $h \rightarrow invisible$ в рамках модели Higgs-portal Dark Matter. Верхний предел пересчитан на сечение взаимодействия Dark Matter частицы с нуклоном в зависимости от массы Dark Matter частицы и сравнен с результатами подземных экспериментов.

В Заключение диссертации суммируются следующие основные результаты и выводы:

- Заряженный бозон Хиггса с массой ≤ 160 ТэВ исключён в рамках модели MSSM. Это означает, что открытый h -

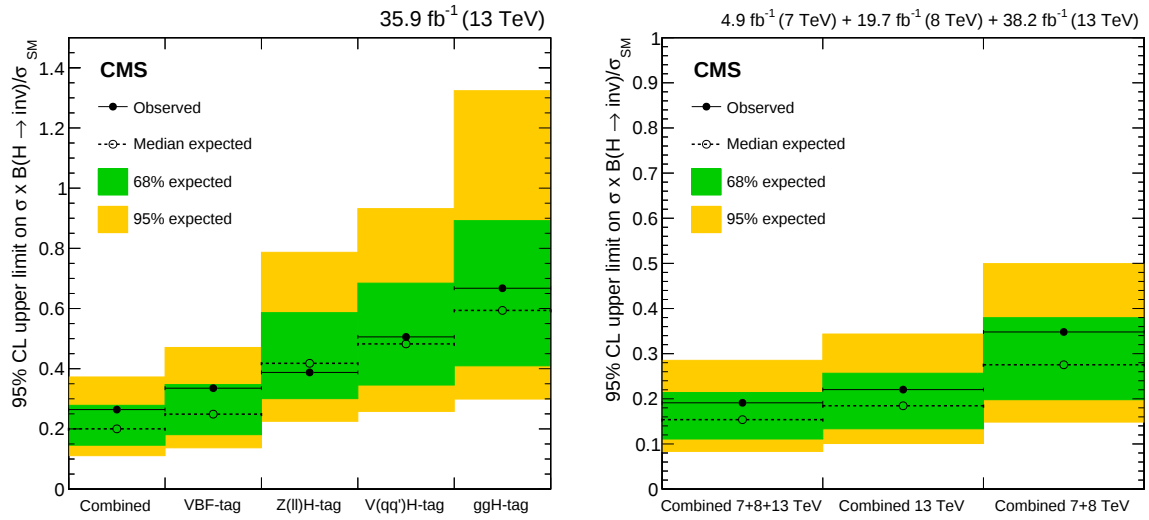


Рис. 9: Слева: наблюдаемые и ожидаемые на 95% уровне достоверности верхние пределы на $(\sigma/\sigma_{\text{SM}}) \mathcal{B}(h \rightarrow \text{inv})$ для VBF, Z($\ell\ell$)h, V(qq')h и механизма рождения ggh , и для их комбинаций с учетом массы бозона Хиггса, предсказываемого Стандартной моделью, равной 125.09 GeV. Справа: наблюдаемые и ожидаемые на 95% уровне достоверности верхние пределы на $(\sigma/\sigma_{\text{SM}}) \mathcal{B}(h \rightarrow \text{inv})$ для объединенных результатов выборок 7+8, 13 TeV и их комбинации, в предположении сечения рождения бозона Хиггса с массой 125.09 GeV, предсказанного Стандартной Моделью.

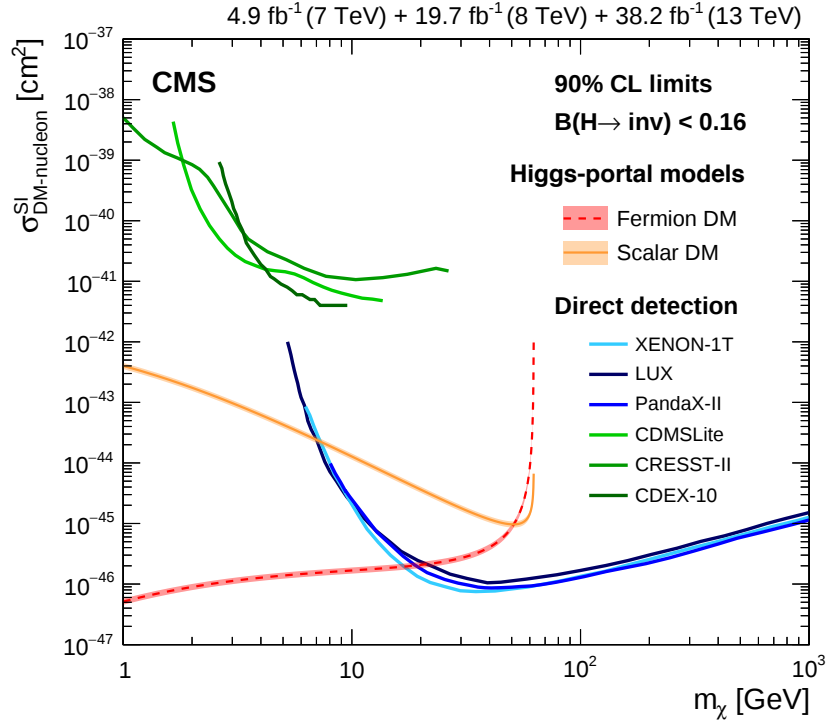


Рис. 10: Верхние пределы на 90% уровне достоверности на сечение спиново-независимого рассеяния частицы темной материи и нуклона in Higgs-portal models, в предположении, что частица темной материи - скаляр (сплошная оранжевая линия) или фермион (пунктирная красная линия). Пределы вычисляются как функции от m_χ . Сделано сравнение с результатами измерения пределов в экспериментах XENON1T [60], LUX [61], PandaX-II [62], CDMSlite [63], CRESST-II [64] и CDEX-10 [65] .

бозон с массой 125 ГэВ является little h-бозоном. При этом интерпретация измерения сечений h -бозона позволяет сделать вывод, что масса нейтрального псевдоскалярного бозона Хиггса A (а следовательно и capital H-бозона) в MSSM должна быть больше чем $\simeq 500$ ГэВ. Поэтому надо продолжить поиски распадов $H/A \rightarrow \tau\tau$, чтобы открыть бозон Хиггса в области больших масс или исключить область больших масс и больших значений $\tan\beta$. Поиски распадов $H \rightarrow hh$ и $A \rightarrow Zh$ становятся при этом менее приоритетными, поскольку они имеют большие сечения только в области масс ≤ 400 ГэВ. Вместо этого, надо начать поиски распадов $H \rightarrow t\bar{t}$ и $H/A \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}$, $H^\pm \rightarrow \tilde{\chi}^0\tilde{\chi}^\pm$, которые в MSSM имеют достаточно большие сечения для больших масс и малых и промежуточных значениях $\tan\beta$. Заметим, что интерпретация $h \equiv H$ пока ещё остаётся в очень ограниченной области параметров MSSM и может быть исключена или подтверждена поисками распада $H^\pm \rightarrow Wh$.

- Так называемый Wrong Sign Yukawa Coupling сценарий в рамках модели 2HDM исключен для масс псевдоскалярного бозона $25 \text{ ГэВ} < m_A < m_h/2$ в результате поиска процесса $pp \rightarrow b\bar{b}A$, $A \rightarrow \mu\mu$, $\tau\tau$. Полностью этот сценарий может быть исключён или открыт, когда измерение сечений h -бозона достигнет точности $\simeq 5\%$. Такая точность может быть достигнута на HL-LHC при интегральной светимости 3 fb^{-1} .
- Измеренные верхние пределы на сечения распадов $h \rightarrow \phi_1\phi_1$ (и, в частности, распада в 4τ конечном состоянии, представленного в диссертации) уже сравнимы с максимально возможными сечениями, предсказываемыми в моделях NMSSM и 2HDM. Трудной для наблюдения ещё остаётся область масс $2m_b < m_{\phi_1} < 20$ ГэВ. Необходимо продолжать поиски этих распадов на HL-LHC. В области масс $2m_b < m_{\phi_1} < 20$ ГэВ, где две b -адронные струи из распада $\phi_1 \rightarrow b\bar{b}$ сливаются в одну, следует попробовать применить специальную технику разделения струй.
- Поиски Dark Matter частиц в распаде $h \rightarrow invisible$ на LHC и в подземных экспериментах дополняют друг друга, будучи интерпретированы в рамках Higgs-portal Dark Matter. Так, распад $h \rightarrow invisible$ дает лучшие пределы на сечение взаимодействия частицы с нуклоном в области масс

$m_{\text{DM}} \leq 10\text{-}20$ ГэВ. В то же время в области больших масс ≥ 20 ГэВ подземные эксперименты более чувствительны (конечно, область масс $m_{\text{DM}} > m_h/2$ кинематически недоступна в распаде $h \rightarrow \textit{invisible}$). Верхний предел на branching fraction $\text{BR}(h \rightarrow \textit{invisible}) < 0.19$, полученный в CMS, уже сравним с максимально возможным значением, предсказываемым в MSSM, но ещё не достиг значений, предсказываемых в NMSSM ($\simeq 8\%$). Необходимо продолжать поиски этого распада на HL-LHC.

Список литературы

- [1] S. L. Glashow, “Partial Symmetries of Weak Interactions”, *Nucl. Phys.* **22** (1961) 579, doi:10.1016/0029-5582(61)90469-2.
- [2] S. Weinberg, “A Model of Leptons”, *Phys. Rev. Lett.* **19** (1967) 1264, doi:10.1103/PhysRevLett.19.1264.
- [3] A. Salam, “Weak and electromagnetic interactions”, in *Elementary particle physics: relativistic groups and analyticity*, N. Svartholm, ed., p. 367. Almqvist & Wiksell, Stockholm, 1968. Proceedings of the eighth Nobel symposium.
- [4] F. Englert and R. Brout, “Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons”, *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 321, doi:10.1103/PhysRevLett.13.321.
- [5] P. W. Higgs, “Broken symmetries, massless particles and gauge fields”, *Phys. Lett.* **12** (1964) 132, doi:10.1016/0031-9163(64)91136-9.
- [6] P. W. Higgs, “Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons”, *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 508, doi:10.1103/PhysRevLett.13.508.
- [7] G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble, “Global Conservation Laws and Massless Particles”, *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 585, doi:10.1103/PhysRevLett.13.585.
- [8] P. W. Higgs, “Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons”, *Phys. Rev.* **145** (1966) 1156, doi:10.1103/PhysRev.145.1156.
- [9] T. W. B. Kibble, “Symmetry breaking in non-Abelian gauge theories”, *Phys. Rev.* **155** (1967) 1554, doi:10.1103/PhysRev.155.1554.
- [10] ATLAS Collaboration, “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, *Phys. Lett. B* **716** (2012) 1, doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020, arXiv:1207.7214.
- [11] CMS Collaboration, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”, *Phys. Lett. B* **716**

- (2012) 30, doi:10.1016/j.physletb.2012.08.021, arXiv:1207.7235.
- [12] CMS Collaboration, “Observation of a new boson with mass near 125 GeV in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV”, *JHEP* **06** (2013) 081, doi:10.1007/JHEP06(2013)081, arXiv:1303.4571.
 - [13] ATLAS, CMS Collaboration, “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.* **114** (2015) 191803, doi:10.1103/PhysRevLett.114.191803, arXiv:1503.07589.
 - [14] CMS Collaboration, “Measurements of properties of the Higgs boson decaying into the four-lepton final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *JHEP* **11** (2017) 047, doi:10.1007/JHEP11(2017)047, arXiv:1706.09936.
 - [15] CMS Collaboration, “Combined measurements of Higgs boson couplings in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *Submitted to: Eur. Phys. J.* (2018) arXiv:1809.10733.
 - [16] ATLAS Collaboration Collaboration, “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb⁻¹ of proton–proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment”, Technical Report ATLAS-CONF-2018-031, CERN, Geneva, Jul, 2018.
 - [17] D. Kazakov, “Beyond the Standard Model’ 17”, *CERN Yellow Rep. School Proc.* **3** (2018) 83–131, doi:10.23730/CYRSP-2018-003.83, arXiv:1807.00148.
 - [18] A. Djouadi, “The Anatomy of electro-weak symmetry breaking. II. The Higgs bosons in the minimal supersymmetric model”, *Phys. Rept.* **459** (2008) 1–241, doi:10.1016/j.physrep.2007.10.005, arXiv:hep-ph/0503173.
 - [19] U. Ellwanger, C. Hugonie, and A. M. Teixeira, “The Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model”, *Phys. Rept.* **496** (2010) 1–77, doi:10.1016/j.physrep.2010.07.001, arXiv:0910.1785.
 - [20] G. C. Branco et al., “Theory and phenomenology of two-Higgs-doublet models”, *Phys. Rept.* **516** (2012) 1, doi:10.1016/j.physrep.2012.02.002, arXiv:1106.0034.

- [21] A. Drozd, B. Grzadkowski, J. F. Gunion, and Y. Jiang, “Extending two-Higgs-doublet models by a singlet scalar field - the Case for Dark Matter”, *JHEP* **11** (2014) 105, doi:10.1007/JHEP11(2014)105, arXiv:1408.2106.
- [22] D. Zeppenfeld, R. Kinnunen, A. Nikitenko, and E. Richter-Was, “Measuring Higgs boson couplings at the CERN LHC”, *Phys. Rev. D* **62** (2000) 013009, doi:10.1103/PhysRevD.62.013009, arXiv:hep-ph/0002036.
- [23] M. Duhrssen et al., “Extracting Higgs boson couplings from CERN LHC data”, *Phys. Rev. D* **70** (2004) 113009, doi:10.1103/PhysRevD.70.113009, arXiv:hep-ph/0406323.
- [24] LHC Higgs Cross Section Working Group Collaboration, “Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 3. Higgs Properties”, doi:10.5170/CERN-2013-004, arXiv:1307.1347.
- [25] LHC Higgs Cross Section Working Group Collaboration, “Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector”, doi:10.23731/CYRM-2017-002, arXiv:1610.07922.
- [26] ALEPH Collaboration, “Search for neutral Higgs bosons decaying into four taus at LEP2”, *JHEP* **05** (2010) 049, doi:10.1007/JHEP05(2010)049, arXiv:1003.0705.
- [27] DELPHI, OPAL, ALEPH, LEP Working Group for Higgs Boson Searches, L3 Collaboration, “Search for neutral MSSM Higgs bosons at LEP”, *Eur. Phys. J. C* **47** (2006) 547, doi:10.1140/epjc/s2006-02569-7, arXiv:hep-ex/0602042.
- [28] OPAL Collaboration, “Search for neutral Higgs boson in CP-conserving and CP-violating MSSM scenarios”, *Eur. Phys. J. C* **37** (2004) 49, doi:10.1140/epjc/s2004-01962-6, arXiv:hep-ex/0406057.
- [29] DELPHI Collaboration, “Higgs boson searches in CP-conserving and CP-violating MSSM scenarios with the DELPHI detector”, *Eur. Phys. J. C* **54** (2008) 1, doi:10.1140/epjc/s10052-008-0647-x, arXiv:0801.3586. [Erratum: doi:10.1140/epjc/s10052-007-0506-1].

- [30] OPAL Collaboration, “Search for a low mass CP odd Higgs boson in e^+e^- collisions with the OPAL detector at LEP-2”, *Eur. Phys. J. C* **27** (2003) 483, doi:10.1140/epjc/s2003-01139-y, arXiv:hep-ex/0209068.
- [31] L3 Collaboration, “Search for an invisibly-decaying Higgs boson at LEP”, *Phys. Lett. B* **609** (2005) 35–48, doi:10.1016/j.physletb.2005.01.030, arXiv:hep-ex/0501033.
- [32] ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, LEP Collaboration, “Search for Charged Higgs bosons: Combined Results Using LEP Data”, *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2463, doi:10.1140/epjc/s10052-013-2463-1, arXiv:1301.6065.
- [33] G. J. Grenier, “Search for supersymmetric charged Higgs bosons at the TeVatron”, in *SUSY 2007 Proceedings, 15th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions, July 26 - August 1, 2007, Karlsruhe, Germany*, pp. 420–425. 2007. arXiv:0710.0853.
- [34] CDF Collaboration, “Search for an Invisible Decaying Higgs Boson in Dilepton Events at CDF”, *Nucl. Part. Phys. Proc.* **273-275** (2016) 2476–2478, doi:10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.430.
- [35] Tevatron New Phenomena and Higgs Working Group Collaboration, “Combined cdf and d0 upper limits on mssm higgs boson production in tau-tau final states with up to 2.2 fb⁻¹”, arXiv:1003.3363.
- [36] M. Carena et al., “MSSM Higgs boson searches at the LHC: Benchmark scenarios after the discovery of a Higgs-like particle”, *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2552, doi:10.1140/epjc/s10052-013-2552-1, arXiv:1302.7033.
- [37] L. Maiani, A. D. Polosa, and V. Riquer, “Bounds to the Higgs Sector Masses in Minimal Supersymmetry from LHC Data”, *Phys. Lett. B* **724** (2013) 274–277, doi:10.1016/j.physletb.2013.06.026, arXiv:1305.2172.
- [38] A. Djouadi et al., “The post-Higgs MSSM scenario: Habemus MSSM?”, *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2650, doi:10.1140/epjc/s10052-013-2650-0, arXiv:1307.5205.

- [39] A. Djouadi et al., “Fully covering the MSSM Higgs sector at the LHC”, *JHEP* **06** (2015) 168, doi:10.1007/JHEP06(2015)168, arXiv:1502.05653.
- [40] E. Bagnaschi et al., “Benchmark scenarios for low $\tan\beta$ in the MSSM”, Technical Report LHCHXSWG-2015-002, CERN, Geneva, Aug, 2015.
- [41] P. Ferreira, J. F. Gunion, H. E. Haber, and R. Santos, “Probing wrong-sign Yukawa couplings at the LHC and a future linear collider”, *Phys. Rev. D* **89** (2014), no. 11, 115003, doi:10.1103/PhysRevD.89.115003, arXiv:1403.4736.
- [42] J. Bernon, J. F. Gunion, Y. Jiang, and S. Kraml, “Light Higgs bosons in two-Higgs-doublet models”, *Phys. Rev. D* **91** (2015) 075019, doi:10.1103/PhysRevD.91.075019, arXiv:1412.3385.
- [43] A. Djouadi, O. Lebedev, Y. Mambrini, and J. Quevillon, “Implications of LHC searches for Higgs–portal dark matter”, *Phys. Lett. B* **709** (2012) 65, doi:10.1016/j.physletb.2012.01.062, arXiv:1112.3299.
- [44] A. Djouadi, A. Falkowski, Y. Mambrini, and J. Quevillon, “Direct detection of Higgs-portal dark matter at the LHC”, *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2455, doi:10.1140/epjc/s10052-013-2455-1, arXiv:1205.3169.
- [45] S. Abdullin et al., “Summary of the CMS potential for the Higgs boson discovery”, *Eur. Phys. J. C* **39S2** (2005) 41–61, doi:10.1140/epjcd/s2004-02-003-9.
- [46] CMS Collaboration, “CMS Physics: Technical Design Report, volume II: Physics performance”, *J. Phys.* **G34** (2007), no. 6, 995–1579, doi:10.1088/0954-3899/34/6/S01.
- [47] CMS Collaboration, “Search for a light charged Higgs boson in top quark decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, *JHEP* **07** (2012) 143, doi:10.1007/JHEP07(2012)143, arXiv:1205.5736.
- [48] CMS Collaboration, “Search for a charged Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, *JHEP* **11** (2015) 018, doi:10.1007/JHEP11(2015)018, arXiv:1508.07774.

- [49] CMS Collaboration, “Search for charged Higgs bosons in the $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$ decay channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *JHEP* **07** (2019) 142, doi:10.1007/JHEP07(2019)142, arXiv:1903.04560.
- [50] CMS Collaboration, “Search for Neutral MSSM Higgs Bosons Decaying to Tau Pairs in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 231801, doi:10.1103/PhysRevLett.106.231801, arXiv:1104.1619.
- [51] CMS Collaboration, “Search for neutral MSSM Higgs bosons decaying to a pair of tau leptons in pp collisions”, *JHEP* **10** (2014) 160, doi:10.1007/JHEP10(2014)160, arXiv:1408.3316.
- [52] CMS Collaboration, “Search for additional neutral MSSM Higgs bosons in the $\tau\tau$ final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *JHEP* **09** (2018) 007, doi:10.1007/JHEP09(2018)007, arXiv:1803.06553.
- [53] CMS Collaboration, “Searches for a heavy scalar boson H decaying to a pair of 125 GeV Higgs bosons hh or for a heavy pseudoscalar boson A decaying to Zh , in the final states with $h \rightarrow \tau\tau$ ”, *Phys. Lett. B* **755** (2016) 217–244, doi:10.1016/j.physletb.2016.01.056, arXiv:1510.01181.
- [54] CMS Collaboration, “Search for a light pseudoscalar Higgs boson produced in association with bottom quarks in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, *JHEP* **11** (2017) 010, doi:10.1007/JHEP11(2017)010, arXiv:1707.07283.
- [55] CMS Collaboration, “Search for a very light NMSSM Higgs boson produced in decays of the 125 GeV scalar boson and decaying into τ leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, *JHEP* **01** (2016) 079, doi:10.1007/JHEP01(2016)079, arXiv:1510.06534.
- [56] CMS Collaboration, “Search for invisible decays of Higgs bosons in the vector boson fusion and associated ZH production modes”, *Eur. Phys. J. C* **74** (2014) 2980, doi:10.1140/epjc/s10052-014-2980-6, arXiv:1404.1344.
- [57] CMS Collaboration, “Search for invisible decays of a Higgs boson produced through vector boson fusion in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, *Phys. Lett. B* **793** (2019) 520–551, doi:10.1016/j.physletb.2019.04.025, arXiv:1809.05937.

- [58] H. Bahl et al., “MSSM Higgs Boson Searches at the LHC: Benchmark Scenarios for Run 2 and Beyond”, arXiv:1808.07542.
- [59] CMS Collaboration, “Search for a Low-Mass Pseudoscalar Higgs Boson Produced in Association with a $b\bar{b}$ Pair in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV”, *Phys. Lett. B* **758** (2016) 296–320, doi:10.1016/j.physletb.2016.05.003, arXiv:1511.03610.
- [60] XENON Collaboration, “Dark matter search results from a one ton-year exposure of XENON1T”, *Phys. Rev. Lett.* **121** (2018) 111302, doi:10.1103/PhysRevLett.121.111302, arXiv:1805.12562.
- [61] LUX Collaboration, “Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure”, *Phys. Rev. Lett.* **118** (2017) 021303, doi:10.1103/PhysRevLett.118.021303, arXiv:1608.07648.
- [62] PandaX-II Collaboration, “Dark matter results from first 98.7 days of data from the PandaX-II experiment”, *Phys. Rev. Lett.* **117** (2016) 121303, doi:10.1103/PhysRevLett.117.121303, arXiv:1607.07400.
- [63] SuperCDMS Collaboration, “New Results from the Search for Low-Mass Weakly Interacting Massive Particles with the CDMS Low Ionization Threshold Experiment”, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 071301, doi:10.1103/PhysRevLett.116.071301, arXiv:1509.02448.
- [64] CRESST Collaboration, “Results on light dark matter particles with a low-threshold CRESST-II detector”, *Eur. Phys. J. C* **76** (2016) 25, doi:10.1140/epjc/s10052-016-3877-3, arXiv:1509.01515.
- [65] CDEX Collaboration, “Limits on light weakly interacting massive particles from the first $102.8 \text{ kg} \times \text{day}$ data of the CDEX-10 experiment”, *Phys. Rev. Lett.* **120** (2018) 241301, doi:10.1103/PhysRevLett.120.241301, arXiv:1802.09016.