

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ATLAS И CMS НА БАК

*А. Г. Мягков**

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия

В обзоре представлены новые результаты экспериментов ATLAS и CMS, полученные на Большом адронном коллайдере.

Recent results from ATLAS and CMS experiments are presented in this review.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

ВВЕДЕНИЕ

Представлены некоторые новые результаты, полученные в экспериментах ATLAS [1] и CMS [2] на Большом адронном коллайдере (БАК). Рассматриваются работы по новым измерениям в рамках Стандартной модели (СМ), физика бозона Хиггса, поиск проявлений новой физики за рамками СМ. Результаты коллабораций ATLAS и CMS были получены на основе анализа данных, собранных в течение сеанса 2 при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и набранной светимости порядка 140 фб^{-1} . Также для некоторых результатов используется статистика, набранная в начавшемся в июле 2022 г. сеансе 3 при энергии $\sqrt{s} = 13,6$ ТэВ, с интегральной доставленной светимостью 100 фб^{-1} .

ПРОЦЕССЫ С ОБРАЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНЫХ БОЗОНОВ

Изучение реакций образования дибозонов в экспериментах на адронном коллайдере открывает возможности для изучения законов взаимодействия калибровочных векторных бозонов, как это предсказывает электрослабый сектор СМ. Точные измерения дифференциальных сечений служат важным тестом пертурбативных поправок в квантовой хромодинамике и электрослабой теории. Знание характеристик процессов образования дибозонов также очень важно для прецизионных измерений в рамках СМ и поиска новых явлений за пределами СМ, поскольку такие процессы часто являются источниками фонов. В настоящее время изучено большое количество процессов образования пар векторных бозонов.

* E-mail: miagkov@thep.ru

Наблюдается высокий уровень согласия с предсказаниями СМ. Важным подклассом процессов образования бозонов являются процессы слияния векторных бозонов (VBF) и рассеяния векторных бозонов (VBS). Первоначально в протоне нет векторных бозонов, они появляются в результате излучения кварком из протона, при этом сам кварк приобретает большой поперечный импульс. Такие реакции выделяются по наличию в событии двух энергичных струй с большой разницей в псевдобыстроте. На рис. 1, *a* приведен обзор результатов эксперимента CMS по

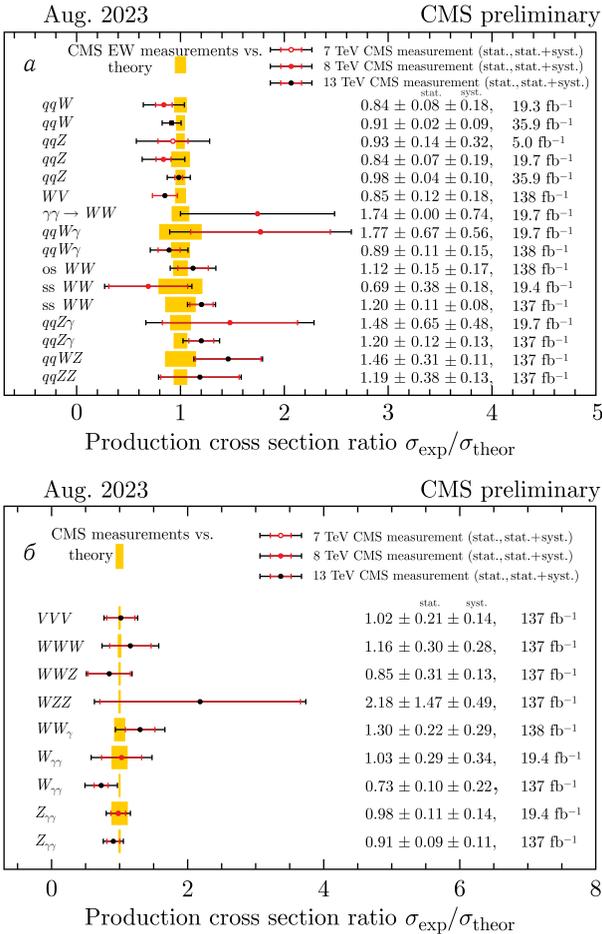


Рис. 1. *a*) Сечения чисто электрослабых взаимодействий (EWK) между калибровочными бозонами по сравнению с предсказаниями теории. *b*) Сечения образования трех бозонов по сравнению с предсказаниями теории

измерению чисто электрослабых взаимодействий между калибровочными бозонами.

Точное измерение сечений образования трех векторных бозонов возможно на БАК только при наличии достаточной статистики. Любые отклонения от предсказаний СМ могут сигнализировать о наличии новой физики на более высоком энергетическом масштабе, которая в настоящее время недоступна. Более того, эти процессы чувствительны к вкладам бозона Хиггса. Все это делает соответствующие исследования в экспериментах ATLAS и CMS интересными. На рис. 1, б приведены сечения образования трех векторных бозонов в сравнении с теорией.

Коллаборация ATLAS представила результаты [3] измерения сечения реакции образования $W(l\nu)\gamma\gamma$ в протон-протонных столкновениях. В этом измерении используется полная выборка событий второго сеанса, набранная при энергии центра масс $\sqrt{s} = 13$ ТэВ детектором ATLAS на БАК, что соответствует интегральной светимости 140 фб^{-1} . Рассматривались события с W -бозоном, распадающимся по лептонной моде, и, по крайней мере, двумя фотонами. Процесс наблюдается со значимостью 5,6 стандартных отклонений. Суммарное сечение в каналах $W(e\nu)\gamma\gamma$ и $W(\mu\nu)\gamma\gamma$, $\sigma_{\text{fid}} = (13,8 \pm 1,1(\text{стат.})_{-2,0}^{+2,1}(\text{сист.}) \pm 0,1(\text{свет.})) \text{ фб}$, соответствует предсказанию СМ.

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ТОП-КВАРКА [4]

Значение массы топ-кварка критично для решения вопроса о (мета) стабильности вакуума СМ. В течение 2011–2012 гг. коллаборации ATLAS и CMS набрали большое количество данных по образованию пар топ-антитоп при энергиях $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ. Коллаборации провели многочисленные измерения (m_t) с использованием этих данных. В работе [4] представлена комбинация 15 измерений массы топ-кварка, выполненных в экспериментах ATLAS и CMS. Используемые наборы данных соответствуют интегральной светимости до 5 и 20 фб^{-1} протон-протонных столкновений при энергиях центра масс 7 и 8 ТэВ соответственно. Комбинация включает в себя измерения событий процессов образования пар топ-кварков, в которых использовались как полулептонные, так и адронные распады топ-кварков, а также измерения с использованием событий, обогащенных рождением одиночных топ-кварков через электрослабый t -канал. Эта комбинация учитывает корреляции между измерениями и обеспечивает уменьшение общей неопределенности на 31% по сравнению с наиболее точными входными измерениями. Результат комбинации: $m_t = (172,52 \pm 0,14(\text{стат.}) \pm 0,30(\text{сист.})) \text{ ГэВ}$ при общей неопределенности 0,33 ГэВ.

На рис. 2 приведено сравнение отдельных измерений m_t и результатов их комбинации m_t .

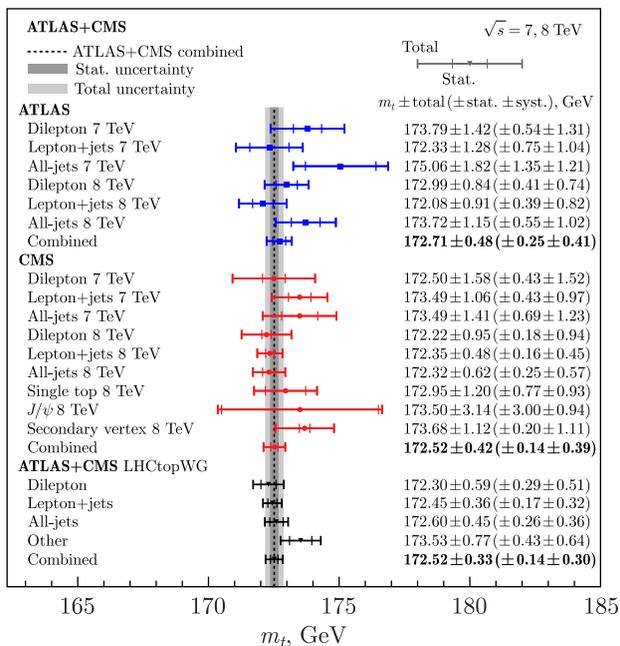


Рис. 2. Сравнение отдельных измерений m_t и результатов их комбинации

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ЧЕТЫРЕХ ТОП-КВАРКОВ

Процесс образования четырех топ-кварков в протон-протонных столкновениях является одним из самых редких процессов, наблюдаемых в настоящее время на адронных коллайдерах. Рождение четырех топ-кварков происходит преимущественно за счет сильного взаимодействия, но немалый вклад вносят и электрослабые процессы. Сечение может быть увеличено во многих моделях за рамками СМ, включая рождение пар глюино в суперсимметричных теориях, связанное рождение тяжелого скалярного или псевдоскалярного бозона с парой топ-кварков, в моделях с двумя дублетами Хиггса или в моделях топ-кварковой составленности. Сечение чувствительно к величине юкавской константы топ-кварка, а также к его свойствам зарядового сопряжения и четности (CP), к различным четырехфермионным взаимодействиям.

Коллаборация ATLAS выполнила анализ с использованием интегральной светимости 140 fb^{-1} [5]. Отбирались события, содержащие два лептона с одинаковым электрическим зарядом или не менее трех лептонов (электронов или мюонов). Кинематика событий использовалась для отделения сигнала от фона с помощью многомерного дискриминанта,

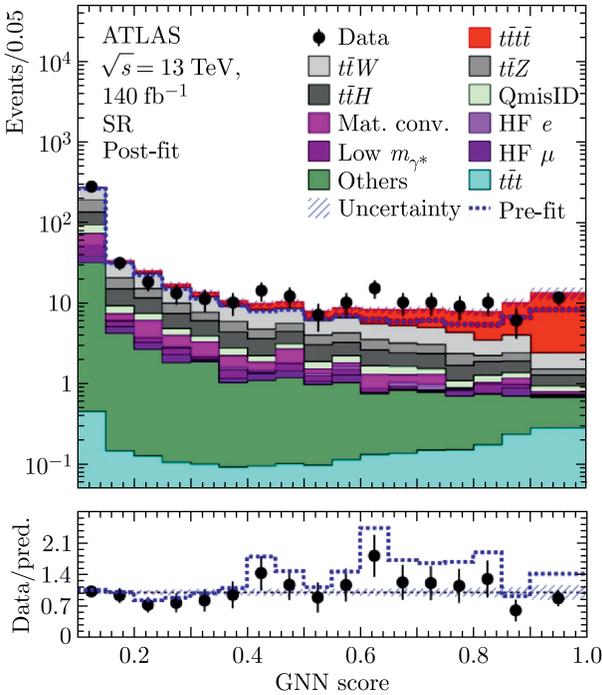


Рис. 3. Сравнение данных с предсказанием для распределения GNN в сигнальной области для процесса $t\bar{t}t\bar{t}$

а выделенные области использовались для ограничения доминирующего фона с использованием методов машинного обучения (рис. 3).

Наблюдаемая (ожидаемая) значимость измеренного сигнала $t\bar{t}t\bar{t}$ относительно нулевой гипотезы СМ составляет 6,1 (4,3) стандартного отклонения. Измеренное сечение образования $t\bar{t}t\bar{t}$ составило $22,5^{+6,6}_{-5,5}$ фб, что совпадает с предсказанием СМ ($12,0 \pm 2,4$) фб в пределах 1,8 стандартного отклонения.

Коллаборация CMS также измерила [6] сечение образования $t\bar{t}t\bar{t}$ $\sigma = 36^{+12}_{-11}$ фб.

НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА КВАНТОВОЙ ЗАПУТАННОСТИ

Если две частицы запутаны, квантовое состояние одной частицы не может быть описано независимо от другой. Эффекты запутывания наблюдались в самых разных системах и на разных расстояниях: от микроскопических до макроскопических. Однако запутанность остается в значительной степени неисследованной при самых высоких доступных энергиях. Наблюдение демонстрирует потенциал использования коллаб-

деров высоких энергий, таких как БАК, в качестве инструментов для тестирования нашего фундаментального понимания квантовой механики.

Недавно самая тяжелая из известных фундаментальных частиц, топ-кварк, была предложена в качестве инструмента для изучения квантовой запутанности. Топ-кварк идеально подходит для измерений спиновых корреляций при высоких энергиях из-за своих уникальных свойств: его огромная масса приводит к времени жизни значительно меньшему, чем время, необходимое для формирования адронов, в которых квантовые числа будут скрыты эффектами адронизации и спиновой декорреляции. В результате информация о его спине передается продуктам его распада. Это дает возможность изучить квазисвободный кварк, свободный от эффектов сильного взаимодействия, ограничивающих цвет.

Спиновая запутанность обнаруживается путем измерения наблюдаемой D , получаемой из угла между заряженными лептонами в их родительской вершине и системы покоя анти-кварка. Явление запутанности проявляется на пороге образования пары топ-анти-кварков.

Коллаборация ATLAS исследовала [7] эффекты квантовой запутанности в событиях протон-протонных столкновений при энергии центра масс 13 ТэВ. Измеренный маркер запутанности равен $D = -0,547 \pm \pm 0,002(\text{стат.}) \pm 0,021(\text{сист.})$ для $340 < m_{tt} < 380$ ГэВ (рис. 4). Измеренное значение D отличается более чем на 5 стандартных отклонений от сценария без запутывания и, следовательно, представляет собой как первое наблюдение запутанности в паре кварков, так и наблюдение с самой высокой энергией на сегодняшний день.

ФИЗИКА БОЗОНА ХИГГСА

В 2012 г. коллаборации ATLAS и CMS объявили об открытии бозона Хиггса. В последующие годы было получено много результатов, описывающих его свойства. В честь десятилетия со дня открытия бозона Хиггса коллаборации ATLAS [8] и CMS [9] опубликовали статьи, в которых основные полученные результаты были систематизированы.

Одной из основных характеристик бозона Хиггса является зависимость его константы связи с другими частицами от массы частиц. На рис. 5 приведена зависимость констант связи от массы частиц с соответствующей нормировкой для фермионов и бозонов. Наблюдается прекрасная линейная зависимость. Измерение юкавской константы связи бозона Хиггса с c -кварком является сложной экспериментальной задачей, поскольку c -кварк является промежуточным между b -кварками и легкими кварками. Небольшая вероятность распада бозона Хиггса на c -кварк и большой фон от КХД-процессов делает эту экспериментальную задачу весьма непростой. Коллаборация CMS [10] разработала новую методику идентификации содержащих c -кварк струй с применением методов машинного обучения. Измерение проводилось в реакции образования VH-ассоциативного рождения бозона Хиггса и векторного бозона V

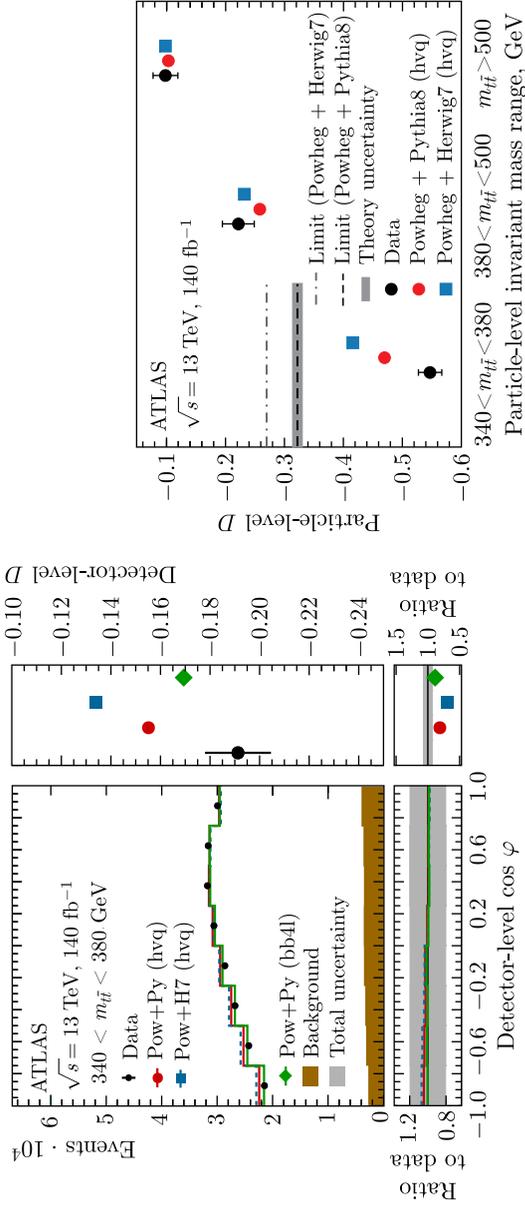


Рис. 4. Измерение эффекта квантовой запутанности в системе $t\bar{t}$

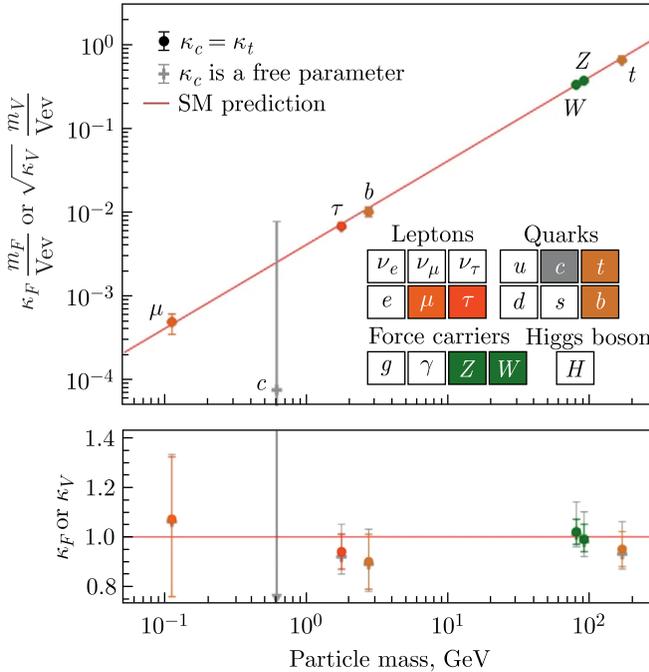


Рис. 5. Зависимость константы связи бозона Хиггса с другими частицами СМ от их массы

(W или Z), причем распад векторного бозона отбирался по лептонной моде — $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$, $Z \rightarrow l\bar{l}$ или $W \rightarrow l\bar{\nu}$, где l — электрон или мюон. Процедура была протестирована при анализе реакции VZ с такими же модами распада векторного бозона V и распадом $Z \rightarrow c\bar{c}$, что явилось первым наблюдением на адронном коллайдере со значимостью 5,7 стандартных отклонений. Для константы связи бозона Хиггса с c -кварком k_c , нормированной на предсказания СМ, наблюдаемый (ожидаемый) интервал уровня достоверности 95% составляет $1,1 < |k_c| < 5,5$ ($|k_c| < 3,4$), что является самым строгим ограничением на сегодняшний день.

ШИРИНА БОЗОНА ХИГГСА

Полная ширина бозона Хиггса является одним из его наиболее фундаментальных свойств. СМ предсказывает значение 4,07 МэВ. Экспериментальное разрешение детекторов ограничивает прямое измерение ширины бозона Хиггса на уровне 1–2 ГэВ. Для измерения ширины бозона Хиггса применяется непрямой метод, использующий сравнение сечения образования бозона Хиггса в пике с сечением его образования вне массовой поверхности. Коллаборация CMS получила [11] значение для ширины

бозона Хиггса $\Gamma_H = 3,2_{-1,7}^{+2,4}$ МэВ, что согласуется с значением SM в 4,1 МэВ.

Коллаборация ATLAS выполнила похожее измерение [12] и получила результат для ширины бозона Хиггса $\Gamma_H = 4,5_{-2,5}^{+3,3}$ МэВ, сравнимый с результатом коллаборации CMS.

САМОДЕЙСТВИЕ БОЗОНОВ ХИГГСА

Одним из наиболее интригующих и интересных свойств SM является то, что калибровочная электрослабая симметрия спонтанно нарушается из-за нетривиальной структуры потенциала бозона Хиггса, связанной с его самодействием. В SM значение константы связи λ_{HHH} полностью определяется массой бозона Хиггса, M_H , и его вакуумным ожиданием. Таким образом, измерения λ_{HHH} обеспечивают уникальный тест на непротиворечивость SM , предоставляя ценную информацию о форме скалярного потенциала. В экспериментах на БАК λ_{HHH} напрямую определяется измерениями образования пар бозонов Хиггса (HH). Сечения этих процессов очень малы, поэтому наиболее чувствительными модами распада являются каналы двойного распада Хиггса: $b\bar{b}\gamma\gamma$, $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ и $b\bar{b}b\bar{b}$.

Коллаборация CMS провела поиск [15] образования двух скалярных бозонов в процессах с конечным состоянием с двумя фотонами и двумя тау-лептонами. Поиск учитывает как нерезонансное образование пары бозонов Хиггса, HH , так и резонансное образование нового бозона X ,

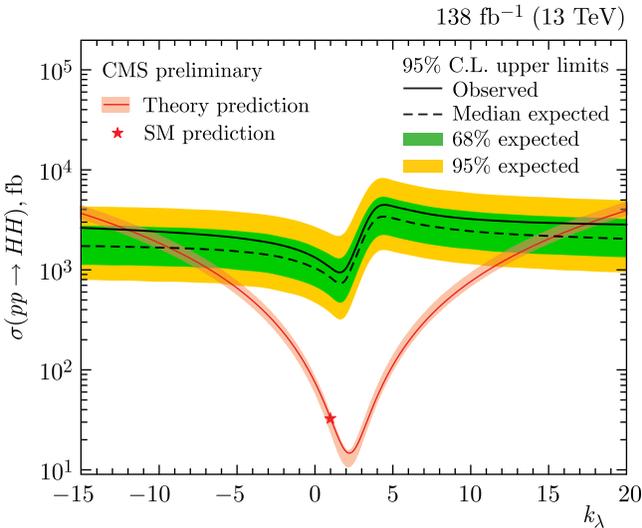


Рис. 6. Ожидаемый и наблюдаемый верхние пределы нерезонансного сечения рождения HH при уровне достоверности 95 %, полученные для различных значений

который распадается либо на HH , либо на H и новый скаляр Y . Поиск проводился на выборке событий с двумя фотонами и двумя тау-лептонами. Наблюдаемое (ожидаемое) ограничение на самодействие бозона Хиггса составляет $-13(-11) < k_\lambda < 18(16)$ (рис. 6) при уровне достоверности 95%. Установлено, что наблюдаемые (ожидаемые) верхние пределы при уровне достоверности 95% для сечения образования бозона X с распадом на два бозона Хиггса $X \rightarrow HH$ находятся в пределах от 140 до 2200 (от 200 до 1700) фб в зависимости от m_X . В сценарии $X \rightarrow YH$ наиболее значительное превышение обнаружено для $m_X = 525$ ГэВ и $m_Y = 115$ ГэВ в канале распада $Y \rightarrow \gamma\gamma$ и имеет локальное (глобальное) значение 3,4(0,1) стандартных отклонения. В канале распада $Y \rightarrow \tau\tau$ избыток при $m_X = 320$ ГэВ и $m_Y = 60$ ГэВ находится с локальным (глобальным) значением 2,6 (2,2) стандартных отклонения.

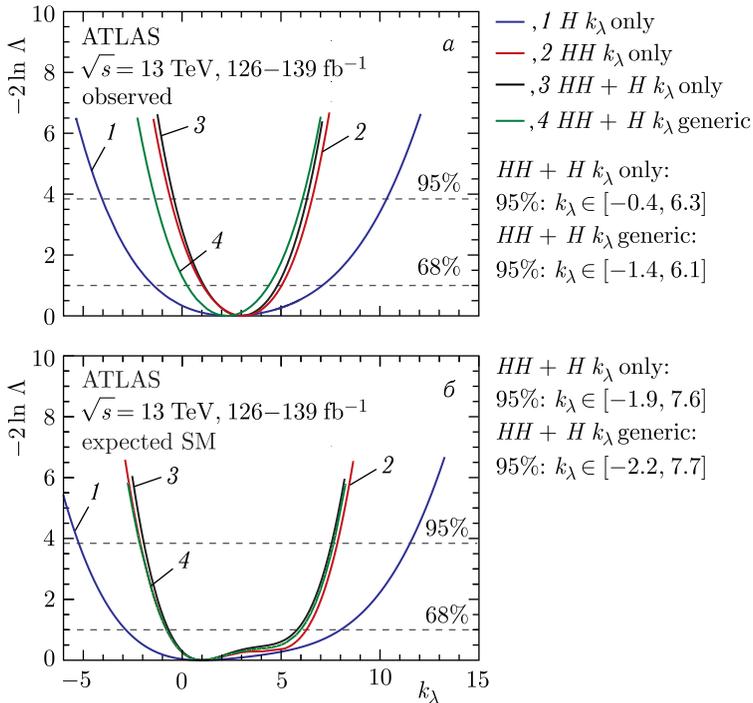


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Наблюдаемые (а) и ожидаемые (б) значения тестовой статистики ($-2 \ln \Lambda$) как функции параметра θ для анализа с одним хиггсом (синий, 1) и двойным хиггсом (красный, 2), а также их комбинации (черный, 3), полученной на основе комбинированного анализа с одним хиггсом и двойным хиггсом, со всеми остальными модификаторами связи, установленными на единицу

В эксперименте АТЛАС были получены [13] ограничения на константы самодействия бозона Хиггса (рис. 7).

Коллаборация ATLAS представила новые результаты поиска [14] образования нерезонансной пары бозонов Хиггса в каналах $4V$ ($V = W, Z$), $VV\tau\tau$, 4τ , $\gamma\gamma VV$. События классифицируются в зависимости от количества легких заряженных лептонов (электронов или мюонов), адронно распадающихся тау-частиц и фотонов. Также представлен поиск пар бозонов Хиггса, распадающихся по каналу $bbZZ$ с последующим распадом пары Z бозонов на четыре легких заряженных лептона. Анализ проводился на статистике, набранной во втором сеансе с суммарной светимостью 140 фб^{-1} . Никаких признаков сигнала обнаружено не было, и определено, что наблюдаемый (ожидаемый) верхний предел поперечного сечения для образования нерезонансной пары бозонов Хиггса в $17,6$ ($11,3$) раз превышает предсказанное СМ сечение при уровне достоверности 95% .

ЭКЗОТИКА

Несмотря на то, что СМ описывает огромное количество экспериментальных данных с превосходной точностью, многие вопросы остаются открытыми. К таким вопросам относятся следующие: являются ли известные фермионы действительно фундаментальными или они состоят из еще более мелких составляющих, существуют ли новые векторные бозоны, почему мы наблюдаем три поколения частиц? Много вопросов связано с темной материей. Большое разнообразие исследованных сигнатур и разнообразие рассмотренных моделей оказало мощное влияние на парадигмы физики, выходящие за рамки Стандартной модели. Коллаборация ATLAS опубликовала обзор [16] результатов по поиску экзотики на статистике, полученной во втором сеансе. Коллаборация CMS также провела много анализов по поиску эффектов за рамками СМ. Как правило, в таких анализах результатом являются ограничения на массы новых частиц. На рис. 8 представлены такие ограничения.

Особое внимание было привлечено к поиску проявлений суперсимметрии (SUSY). Сотрудничество ATLAS опубликовало обзор [17] результатов по поиску проявлений SUSY на статистике, полученной во втором сеансе. Среди всех моделей суперсимметрия является одной из наиболее тщательно изученных. Богатое содержание частиц и некоторые свободные параметры, которые необходимо добавить, чтобы придать SUSY нарушенную симметрию, делают SUSY привлекательной основой для устранения многих недостатков минимальной СМ. Квантовые поправки к массе бозона Хиггса, идущие от фермионов, уравниваются поправками от их суперпартнеров, естественным образом стабилизируя массу на значении, близком к электрослабой шкале. Благодаря своей элегантности и гибкости SUSY привлекла значительное внимание теоре-

онно взаимодействующей материи. Природа темной материи в настоящее время неизвестна. Если темная материя реализуется через частицы, то они слабо взаимодействуют с частицами СМ. Есть определенная надежда зарегистрировать слабовзаимодействующие частицы темной материи в экспериментах на БАК. Коллаборации ATLAS и CMS разработали обширную программу поиска кандидатов в темную материю по событиям с большим недостающим поперечным импульсом в конечном состоянии, возникающим от частицы темной материи, покидающей детектор. Процесс образования частицы темной материи происходит в сопровождении других частиц СМ (легких и тяжелых кварков, фотонов, Z- и h-бозонов. Также проводится поиск невидимых распадов бозона Хиггса, что позволяет наложить ограничения на параметры модели темной материи.

ПОИСК ДОЛГОЖИВУЩИХ ЧАСТИЦ

Многие физические модели, выходящие за рамки СМ, предсказывают существование долгоживущих частиц (LLP). Эти частицы проходят значимое расстояние, прежде чем распадутся, оставляя уникальный след

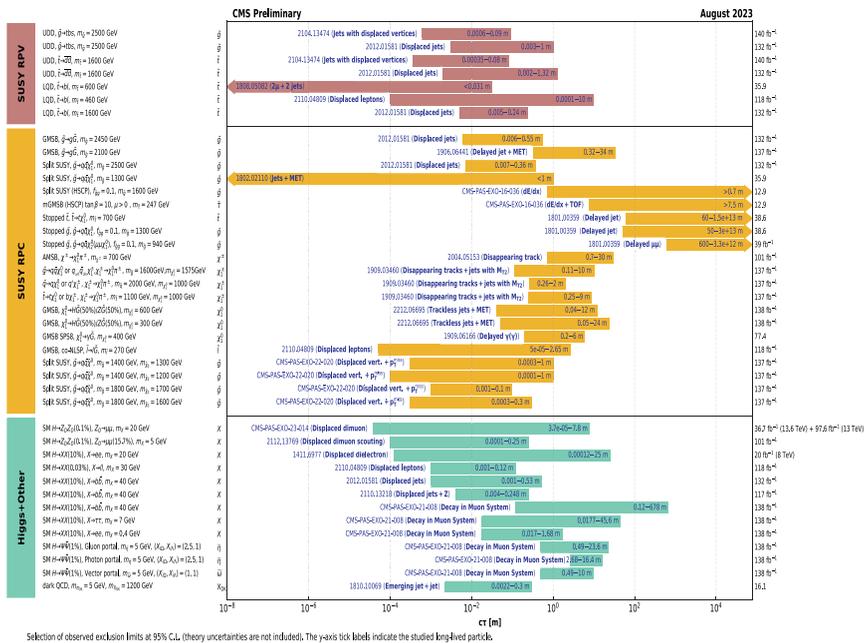


Рис. 9. Гистограмма, представляющая ограничения на продолжительность жизни долгоживущих частиц для выбранного набора новых физических явлений, померенных в CMS

в детекторе, который, как правило, непросто реконструировать. В последние годы в коллаборациях ATLAS и CMS было проведено множество поисковых анализов, направленных на изучение различных сигнатур долгоживущих частиц с использованием новых технологий реконструкции. Результаты коллаборации CMS представлены на рис. 9, где показаны ограничения на время жизни частиц, полученные в рамках различных анализов и моделей.

ПОИСК АНОМАЛИЙ

Большое количество отрицательных результатов по поиску эффектов за рамками SM толкает физиков на отработку новых методик. К таковой можно отнести поиск аномалий — модельно-независимый поиск отклонений от SM. Коллаборация ATLAS провела поиск [19] тяжелого резонанса Y , распадающегося на бозон Стандартной модели Хиггса H и новую частицу X в полностью адронном конечном состоянии. Использован полный набор данных о столкновениях протон–протон при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Поиск нацелен на область больших масс Y , где H и X имеют большой импульс. Новая сигнальная область реализована с использованием методики обнаружения аномалий, где события выбираются исключительно из-за их несовместимости с изученной фоновой моделью. Такой подход является модельно-независимым, что представляет собой первое применение полностью неконтролируемого машинного обучения для анализа ATLAS.

Существенного превышения данных над ожидаемым фоном не наблюдается, и результаты представлены в виде верхних пределов сечения генерации $\sigma(pp \rightarrow Y \rightarrow XH \rightarrow qqbb)$ для сигналов с энергией m_Y от 1,5 до 6 ТэВ и m_X от 65 до 3000 ГэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // J. Instrum. 2008. V. 3. P. S08003.
2. Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.). The CMS Experiment at the CERN LHC // Ibid. P. S08004.
3. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Observation of $W\gamma\gamma$ Triboson Production in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector // Phys. Lett. B. 2024. V. 848. P. 138400.
4. Aad G. et al. (CMS and ATLAS Collabs.). Combination of Measurements of the Top Quark Mass from Data Collected by the ATLAS and CMS Experiments at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. ATLAS-Conf-2023-066. 2023. arXiv:2402.08713v1 [hep-ex].
5. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Observation of Four-Top-Quark Production in the Multilepton Final State with the ATLAS Detector // Eur. Phys. J. C. 2023.
6. Tumasyan A. et al. (CMS Collab.). Evidence for Four-Top-Quark Production in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Lett. B. 2023. V. 844. P. 138076.

7. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Observation of Quantum Entanglement in Top-Quark Pairs. CERN-EP-2023-230; arXiv:2311.07288S [hep-ex].
8. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). A Detailed Map of Higgs Boson Interactions by the ATLAS Experiment Ten Years after the Discovery // Nature. 2022. V. 607. P. 52–59; arXiv:2207.00043 [hep-ex].
9. Tumasyan A. et al. (CMS Collab.). A Portrait of the Higgs Boson by the CMS Experiment Ten Years after the Discovery // Nature. 2022. V. 607. P. 60–68; arXiv:2207.00043 [hep-ex].
10. Tumasyan A. et al. (CMS Collab.). Search for Higgs Boson Decay to a Charm Quark–Antiquark Pair in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. P. 061801.
11. Tumasyan A. et al. (CMS Collab.). First Evidence for Off-Shell Production of the Higgs Boson and Measurement of Its Width // Nat. Phys. 2022. V. 18, No. 6. P. 1329–1334; arXiv:2202.06923 [hep-ex].
12. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Evidence of Off-Shell Higgs Boson Production from ZZ Leptonic Decay Channels and Constraints on Its Total Width with the ATLAS Detector // Phys. Lett. B. 2023. V. 846. P. 138223; arXiv:2304.01532v2 [hep-ex].
13. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Constraints on the Higgs Boson Self-Coupling from Single- and Double-Higgs Production with the ATLAS Detector Using pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys. Lett. B. 2023. V. 843. P. 137745; arXiv:2211.01216v2 [hep-ex].
14. ATLAS Collab. Search for Non-Resonant Higgs Boson Pair Production in Final States with Leptons, Taus and Photons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2024-005. 2024.
15. CMS Collab. Search for the Nonresonant and Resonant Production of a Higgs Boson in Association with an Additional Scalar Boson in the $\gamma\gamma\tau\tau$ Final State. CMS PAS HIG-22-012. 2024.
16. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Exploration at the High-Energy Frontier: ATLAS Run 2 Searches Investigating the Exotic Jungle beyond the Standard Model. arXiv:2403.09292 [hep-ex].
17. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). The Quest to Discover Supersymmetry at the ATLAS Experiment. arXiv:2403.02455 [hep-ex].
18. Hayrapetyan A. et al. (CMS Collab.). Search for Dark Matter Particles in W^+W^- Events with Transverse Momentum Imbalance in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // J. High Energy Phys. 2024. V. 03. P. 134; arXiv:2310.12229v2 [hep-ex].
19. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Anomaly Detection Search for New Resonances Decaying into a Higgs Boson and a Generic New Particle in Hadronic Final States Using $\sqrt{s} = 13$ TeV Collisions with the ATLAS Detector // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. P. 052009; arXiv:2306.03637v2 [hep-ex].