

На правах рукописи



Гаврилюк Александр Александрович

**Исследование канала распада бозона Хиггса
 $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ на установке ATLAS**

Специальность 1.3.15. —
«Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких
энергий»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Научный руководитель: **Цукерман Илья Ильич**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нейтринной физики Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Невзоров Роман Борисович**
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории квантовой теории поля Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва;

Кодолова Ольга Леонидовна
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сильных взаимодействий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Москва.

Ведущая организация: Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна.

Защита состоится 19 июня 2024 г., начало в 15:00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.05 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2024 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
02.1.003.05,
доктор физико-математических наук,
доцент

Б.р.Се

А. Л. Барабанов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Как известно, Стандартная модель (СМ) элементарных частиц описывает три их фундаментальных взаимодействия: сильное, электромагнитное и слабое. До 2012 г. последней не обнаруженной на опыте фундаментальной частицей СМ был бозон Хиггса (H). Он был открыт на гигантских экспериментальных установках ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере (LHC) [1; 2]. Последующие более точные измерения этими же сотрудничествами подтвердили, что бозон Хиггса с массой около 125 ГэВ обладает нулевым спином и положительной чётностью [3; 4] и что все его измеренные константы связи согласуются с СМ [5; 6]. Изучение канала распада $H \rightarrow WW^*$, который рассматривается в диссертации, внесло существенный вклад в этот вывод. Используя конечное состояние $e\nu\mu\nu$ в эксперименте ATLAS (с непосредственным участием автора), удалось измерить сечение рождения бозона Хиггса в указанном канале распада в основном механизме рождения за счёт слияния глюонов (ggF) с точностью около 10% [A1; A2]. Это позволило (наряду с измерениями в других каналах распада) получить рекордную точность почти в 5% для его полного сечения [5].

Обнаружение H явилось безусловным триумфом Стандартной модели. Однако в её рамках невозможно описать многие экспериментальные факты. Поэтому теоретики продолжают работать над расширениями СМ, в которых эти факты можно разумно интерпретировать, хотя многие модели и/или большой диапазон параметров в других моделях были отвергнуты научным сообществом после открытия бозона Хиггса и довольно точных измерений его характеристик. В частности, многие оставшиеся модели предсказывают существование тяжёлого нейтрального бозона Хиггса с массой большей, чем 125 ГэВ, или других резонансов (R) со спином 0, 1 или 2, распадающихся на пару тяжёлых векторных бозонов. Поэтому поиски таких частиц являются важной задачей современной физики высоких энергий. Их обнаружение будет однозначно говорить о выходе за пределы СМ. Если же новые резонансы не удастся увидеть, то можно будет сильно ограничить параметры существующих моделей путём постановки экспериментальных верхних пределов на сечение рождения этих резонансов. Канал распада $R \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$, рассматриваемый в диссертации, имеет большую относительную вероятность во многих популярных моделях, включая СМ, и рассматривается как один из перспективных для поиска в эксперименте ATLAS.

Целью данной работы является измерение констант связи стандартного бозона Хиггса, а также поиск дополнительных резонансов (включая тяжёлый бозон Хиггса) в канале распада $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ с использованием полного набора данных с эксперимента ATLAS при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, что ставит перед собой следующие **задачи**:

1. Исследование свойств адронных струй на основе данных 2015 – 2016 г. с двумя лептонами в конечном состоянии.

2. Расширение этого исследования на экспозиции 2017 – 2018 гг. при условиях повышенной светимости LHC.
3. Измерение сечения рождения бозона Хиггса SM в механизме ggF на полной статистике событий с электроном и мюоном в конечном состоянии.
4. Постановка верхних пределов на сечение рождения тяжёлых резонансов для того же конечного состояния и изучение не использованных ранее каналов распада $R \rightarrow WW \rightarrow e\bar{e}\nu$ и $R \rightarrow WW \rightarrow \mu\nu\mu$.

Научная новизна: все результаты, полученные в диссертационной работе, являются новыми. В экспериментах ATLAS и CMS ранее изучался бозон Хиггса SM в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ на полной статистике при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ. Обоиими сотрудничествами проведены измерения как на частичном, так и полном образце событий и при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, причём в соответствующих исследованиях ATLAS принял непосредственное участие и автор. Что касается тяжёлого резонанса, распадающегося на это же конечное состояние, то поиски проводились в обоих экспериментах как при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, так и $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, но сигнала от новой частицы найдено не было, и были поставлены верхние пределы на сечение её рождения. В указанных исследованиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в эксперименте ATLAS принимал участие и сам автор. Кроме того, при этой энергии мы задействовали каналы с одинаковым ароматом пары лептонов в конечном состоянии. Предыдущее исследование в ATLAS, где были использованы такие каналы, было осуществлено на статистике данных 2012 г. при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ.

Практическая значимость: в диссертационной работе подтверждается надёжность работы подсистем установки ATLAS и алгоритмов восстановления адронных струй, в частности, при рекордной светимости LHC. Содержащиеся в работе оценки применяются также в задачах изучения других каналов распада бозона Хиггса и процессов Стандартной Модели. Полученные в диссертации результаты были использованы для улучшения точности измерения в эксперименте ATLAS сечения рождения H в механизме слияния глюонов и для постановки верхних пределов на сечение рождения гипотетических тяжёлых резонансов, распадающихся на пару W , а разработанные алгоритмы используются (и будут использоваться) при анализе последующих экспозиций на LHC для изучения бозона Хиггса и поиска подобных ему нестандартных частиц, в том числе и при работе при сверхвысокой светимости на модернизированном коллайдере LHC (HL-LHC).

Представленная работа выполнена в рамках участия НИЦ «Курчатовский институт» в международном сотрудничестве ATLAS в составе рабочей группы HWW. Тема работы соответствует программе эксперимента ATLAS, а именно направлению, которое включает в себя изучение бозона Хиггса SM и поиск новых частиц. Результаты положили начало созданию серии новых исследований как по уточнению уже измеренных его характеристик в канале распада $H \rightarrow$

$WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$, так и по измерению дифференциальных и полных сечений его рождения при большей светимости и энергии LHC.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика анализа характеристик адронных струй в фоновых процессах к рождению бозона Хиггса и тяжёлых резонансов на основе анализа данных эксперимента ATLAS с Z -бозонами [A3–A5].
2. Измерены распределения по поперечной массе бозона Хиггса в распаде $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ на основе анализа данных эксперимента ATLAS 2015 – 2016 гг. [A1].
3. Измерено сечение бозона Хиггса с точностью 12% в основном механизме рождения в канале распада $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ на основе анализа данных эксперимента ATLAS 2015 – 2018 гг. [A2].
4. Рассчитаны ожидаемые верхние пределы на 95% уровне достоверности для сечения рождения тяжёлых резонансов в каналах распада $R \rightarrow WW \rightarrow e\nu e\nu$ и $R \rightarrow WW \rightarrow \mu\nu\mu\nu$ в диапазоне масс от 200 до 5000 ГэВ с интерпретацией в рамках нескольких теоретических моделей на основе анализа данных эксперимента ATLAS 2015 – 2018 гг. с предложенными и оптимизированными автором критериями отбора событий [A6; A7].

Достоверность изложенных результатов обеспечивается применением широко используемых программ моделирования и реконструкции; проверкой качества моделирования в специальных контрольных областях, ортогональных к сигнальным; использованием стандартизованных алгоритмов обработки данных; экспертной проверкой полученных результатов в рамках соответствующих рабочих групп сотрудничества ATLAS, включая HWW. Полученные результаты находятся в согласии с результатами, полученными в эксперименте CMS на LHC.

Апробация работы. Материалы, изложенные в диссертации, обсуждались на внутренних совещаниях рабочих групп ATLAS в CERN и были опубликованы в соавторстве с научным руководителем в виде нескольких внутренних отчётов ATLAS. Наиболее важные результаты докладывались автором на российских и международных конференциях и школах (International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA) 2016, 2022, Moscow International School of Physics 2022, International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP) 2023, Курчатовская молодёжная научная школа 2015, II Межинститутская молодёжная конференция РАН и НИЦ КИ ИТЭФ, Молодежные конференции по теоретической и экспериментальной физике 2016 – 2021) и были опубликованы в виде восьми статей в научных журналах, включая две публикации всего сотрудничества ATLAS [A1; A2].

Личный вклад. Диссертант работает с 2014 г. в качестве члена группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ (с 2022 г. – НИЦ КИ) в сотрудничестве ATLAS. Он принимал участие в регламентных работах по контролю качества данных в жидкоаргоновых (LAr) калориметрах и занимался модернизацией

программного обеспечения с общим засчитанным Институту вкладом более 1.0 человеко-года. Им также выполнена квалификационная работа по этой же тематике, в результате которой диссертант с середины 2018 г. стал соавтором всех публикаций сотрудничества ATLAS. Параллельно он занимался следующими физическими исследованиями в составе упомянутой рабочей группы HWW:

- принимал участие в разработке и тестировании используемого группой пакета программ для анализа на основе информационной среды ROOT. Существенным вкладом автора было создание модуля для построения и анализа профильных гистограмм. Кроме того, им были адаптированы коды, использованные для анализа статистики 2015 – 2016 гг., для новой версии ПО ATLAS с целью обработки полной статистики 2015 – 2018 гг., и запущен новый анализ;
- детально изучил адронные струи в ди-лептонных событиях с Z -бозоном при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, что позволило понять их характеристики даже в наиболее сложных кинематических областях [A4; A5]. Особое внимание уделялось струям, летящим под малыми углами при большой светимости LHC. Это исследование было важно не только для изучения стандартного бозона Хиггса [A1; A2] и поиска тяжёлого бозона Хиггса в канале распада на два W [7], но и для других задач эксперимента ATLAS;
- занимался производством смоделированных событий. Для канала с одинаковым ароматом лептонов разработал и применил схему фильтрации событий, десятикратно сокращающую размер входных файлов;
- внёс определяющий вклад в анализ каналов $R \rightarrow WW \rightarrow e\nu e\nu$ и $R \rightarrow WW \rightarrow \mu\nu\mu\nu$ на полной статистике 139 fb^{-1} при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и повышенной светимости LHC [A6; A7];
- внёс существенный вклад в две публикации ATLAS и определяющий – в 5 остальных.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в семи статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК, индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus. Зарегистрирована одна программа для ЭВМ.

Содержание работы

Во **введении** представлены актуальность темы исследования, изложенного в диссертации, личный вклад автора в это исследование, положения, выдвигаемые на защиту, публикации и апробация работы и достоверность результатов, а также научная новизна и практическая ценность работы.

В **первой главе** сначала рассматривается феноменология бозона Хиггса SM и удобные каналы распада для его поиска, затем кратко описываются

некоторые популярные модели для нестандартного тяжёлого бозона Хиггса и других резонансов, которые могут распадаться на пару W -бозонов. Наконец, даётся описание коллайдера LHC и экспериментальной установки ATLAS на нём, формулируются их цели и задачи, приводятся их параметры, физические характеристики, текущий статус и планы развития; более подробно говорится о калориметрах, в проверке качества данных с которых автор принимал непосредственное участие. Затем описывается процедура моделирования, восстановления и анализа событий в эксперименте ATLAS, особое внимание уделяется адронным струям.

В первом разделе первой главы кратко описываются механизмы рождения бозона Хиггса SM при массе 125 ГэВ, включая соответствующие сечения при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в основном механизме – слияния глюонов (ggF). Затем рассматриваются моды его распада и приводятся их ожидаемые относительные вероятности (\mathcal{B}). Конечное состояние $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ является одним из наиболее перспективных с точки зрения экспериментального исследования, поскольку имеет значительную \mathcal{B} и достаточно чистую сигнатуру. Однако, из-за наличия двух нейтрино возможно восстановить лишь т. н. «поперечную» массу бозона Хиггса.

Во втором разделе первой главы рассматриваются основные механизмы рождения и распадов тяжёлых резонансов, предсказываемых в различных популярных расширениях SM и даётся их краткий обзор. Подробнее описывается канал распада $R \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$, изучаемый в диссертации; при этом обсуждаются не только скалярные резонансы, но также векторные и тензорные их варианты.

В третьем разделе первой главы даётся краткое описание LHC, основные задачи которого – изучение SM в новом диапазоне энергий (в частности, бозона Хиггса), прецизионные измерения важнейших параметров SM и поиск новой физики за пределами SM , (прежде всего, новых тяжёлых частиц). Рекордные значения энергии столкновения протонов и светимости LHC позволяют успешно выполнить эти задачи. ATLAS и CMS – два наиболее крупных многоцелевых эксперимента на LHC; в каждом из этих международных союзов работает более 3000 физиков из различных организаций. Гигантские установки этих экспериментов имеют массу несколько тысяч тонн, а продольные и поперечные размеры каждой из них составляют десятки метров.

В четвёртом разделе первой главы довольно подробно представлена установка ATLAS (Рисунок 1) – детектор для физики частиц с симметричной цилиндрической геометрией вперёд-назад и почти с полным перекрытием по азимутальному углу. Он состоит из внутреннего трекового детектора, окружённого сверхпроводящим соленоидом с магнитным полем 2 Тл, электромагнитных и адронных калориметров и мюонного спектрометра, в который входит три больших сверхпроводящих тороидальных магнита. Внутренний детектор перекрывает область псевдобыстрот $|\eta| \leq 2.5$ и состоит из многих слоёв кремниевых, пиксельных и микростриповых детекторов

и детектора переходного излучения. Система калориметров расположена в области $|\eta| \leq 4.9$. Мюонный спектрометр состоит отдельно из триггерных и высокоточных трековых камер, измеряющих отклонение мюонов в магнитном поле, которое вырабатывается сверхпроводящими воздушными тороидами. Система прецизионных камер перекрывает область $|\eta| \leq 2.7$. Мюонная триггерная система перекрывает область $|\eta| \leq 2.4$.

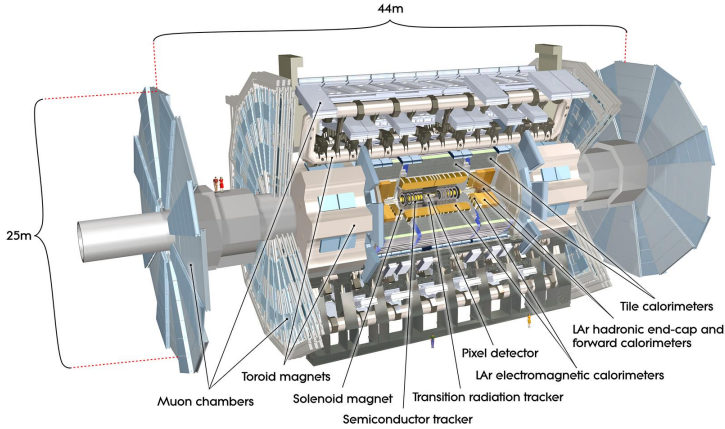


Рисунок 1 — Схематическое изображение детектора ATLAS в разрезе [8]

Электромагнитные жидкоаргоновые (LAr) калориметры с высокой гранулярностью и отличным энергетическим разрешением $\sigma(E)/E = 10\% \sqrt{E} \oplus 0.7\%$ (E в ГэВ) перекрывают диапазон псевдобыстрот $|\eta| \leq 3.2$. В торцах LAr-технология также используется и в адронных калориметрах. Их разрешение к адронным струям – $\sigma(E)/E = 50\% \sqrt{E} \oplus 3\%$. Наконец, передние LAr-калориметры служат для измерения энергии как электромагнитных, так и адронных ливней, обеспечивая герметичность установки. Они перекрывают область псевдобыстрот $3.1 \leq |\eta| \leq 4.9$, имея разрешение $100\% \sqrt{E} \oplus 10\%$. Автор с 2015 года подключился к работе по проверке качества данных ATLAS, поступающих с жидкоаргонового калориметра. Он вошёл в официальную команду специалистов из двух десятков человек, отработав в общей сложности около года по дежурствам.

В **пятом разделе первой главы** кратко описывается процедура моделирования и реконструкции в эксперименте ATLAS.

Моделирование осуществляется в несколько этапов: генерация физического события, его прохождение через установку, оцифровка сработавших элементов детектора, реконструкция событий, создание компактных образцов событий и их физический анализ. Отметим, что реальные

данные проходят ту же процедуру обработки, начиная с оцифровки. Все этапы, за исключением двух последних, осуществляются централизованно с использованием мощностей системы распределённых вычислений GRID. Последние два этапа проводятся силами одной или нескольких рабочих групп ATLAS, в нашем случае, группой HWW.

В **шестом разделе первой главы** говорится о восстановлении адронных струй в эксперименте ATLAS.

В последнее время в экспериментах ATLAS (и CMS) использовались два типа алгоритмов реконструкции струй. Первый основан на т. н. топологических кластерах, восстановленных в калориметре, а второй, более новый и перспективный – на потоке частиц, при этом используется и трековая и калориметрическая информация.

Наконец, в **седьмом разделе первой главы** даётся сжатое описание процедуры компьютерного анализа событий в эксперименте ATLAS на примере группы HWW, которым непосредственно занимался сам автор.

Общая идея состоит в преобразовании набора индивидуальных событий с присущими им кинематическими характеристиками лептонов и адронных струй в графики распределений и таблицы числа событий. Анализ выполняется путём последовательного прогона четырёх сценариев, написанных на языке высокого уровня Python.

Во **второй главе** представлены результаты изучения адронных струй в ди-лептонных событиях с Z -бозоном, важные как для задачи исследования стандартного, так и поиска тяжёлого бозона Хиггса в канале $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$. Проведено детальное сравнение реальных данных с результатами MC-моделирования. Особое внимание уделялось анализу кинематики событий, в которых адронные струи летели под малыми полярными углами. Характерная особенность экспериментов ATLAS и CMS на LHC – большое число взаимодействий протонов в одном пересечении пучков (μ), прямо пропорциональное его светимости. Наложение посторонних “мягких” событий на искомое «жесткое» может создать проблемы с восстановлением упомянутых адронных струй. Наиболее удобным способом для детального анализа последствий этого эффекта служит анализ образца событий $Z \rightarrow e\bar{e}/\mu\bar{\mu}$, поскольку набранная статистика составляет сотню миллионов событий и, кроме того, он чист от примесных процессов. Отбирались события с двумя жесткими изолированными мюонами или электронами разных знаков с инвариантной массой, близкой к массе Z -бозона.

В **первом разделе второй главы** описывается разработанный автором интерфейс к программному обеспечению группы HWW. Этот интерфейс необходим для построения т. н. «профильных гистограмм», которые показывают зависимость среднего значения одной переменной от неусреднённого значения другой переменной [A3]. В 2020 г. нами было получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ TQProfiles v1.1 [A8].

Во **втором разделе второй главы** подробно представлены результаты изучения свойств адронных струй в событиях с двумя лептонами в конечном состоянии в данных 2015 – 2018 гг.

В **первом подразделе второго раздела второй главы** речь идёт об анализе экспозиций 2015 – 2016 гг. Отбирались события с двумя качественно восстановленными лептонами одного аромата с инвариантной массой ($m_{\ell\ell}$) в области $m_Z \pm 10$ ГэВ. Откалиброванные струи, восстановленные алгоритмом на основе топологических кластеров в калориметре (EMТоро) должны были иметь поперечный импульс $p_T \geq 30$ ГэВ в области псевдобыстрот $|\eta| \leq 4.5$. Всего было обнаружено 13.5 млн (18.3 млн) событий с двумя электронами (двумя мюонами), соответственно. Были учтены все систематические погрешности, связанные с адронными струями [A4]. Распределения по множественности и поперечному импульсу адронных струй неплохо описываются МС-моделированием. Рисунок 2 показывает распределение по псевдобыстроте лидирующей струи для случая по крайней мере двух струй ($N_{\text{jet}} \geq 2$) [A4]. В области $|\eta| \leq 3.5$ данные и результаты моделирования согласуются друг с другом. В диапазоне $3.6 \leq |\eta| \leq 4.2$ наблюдается 15%-ный дефицит событий в данных, что однако находится в пределах систематических погрешностей. Сходные выводы могут быть сделаны и для спектров по псевдобыстроте второй струи. Используя

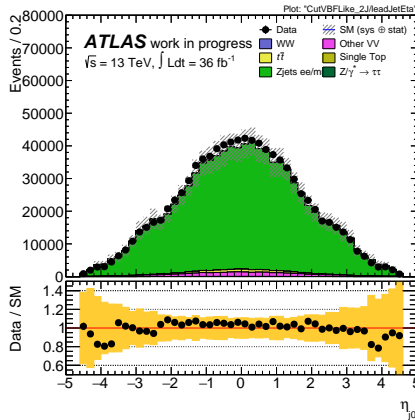


Рисунок 2 — Распределения по псевдобыстроте лидирующей струи для событий с $N_{\text{jet}} \geq 2$ для конечного состояния $Z \rightarrow ee$ [A4]

упомянутый ранее пакет для построения профильных гистограмм, мы изучили зависимости разных характеристик струй от величины μ и обнаружили заметный (и линейный) рост среднего числа адронных струй, летящих под малыми полярными углами [A4] в событиях $Z \rightarrow \mu\mu$, который неплохо описывается

МС-моделированием; с другой стороны, сама множественность немного переоценена в МС.

Во **втором подразделе второго раздела второй главы** представлены результаты детального сравнения двух алгоритмов адронных струй для данных 2017 – 2018 гг., набранных при более высокой светимости LHC, чем в 2015 – 2016 гг.

В 2017 – 2018 гг. была накоплена почти втрое большая статистика, чем за предыдущие два года; повышение светимости привело также к росту μ и усложнению реконструкции адронных струй, особенно вне области перекрытия трекера. По этой причине специалистами был разработан новый алгоритм их восстановления на основе потока частиц (EMPF_{low}), существенно более устойчивый к эффекту наложения событий, чем предыдущий (EMT_{oro}). Всего нами было восстановлено 37.2 млн (48.1 млн) событий $Z \rightarrow ee$ ($Z \rightarrow \mu\mu$) после ограничения $|m_{\ell\ell} - m_Z| \leq 10$ ГэВ. Для случая EMPF_{low} МС хорошо описывает данные по множественности струй в интервале $0 \leq N_{\text{jet}} \leq 3$, согласие оказалось намного хуже в случае применения старого алгоритма EMT_{oro}. Спектр по числу струй, летящих вне области перекрытия трекера, тоже лучше воспроизводится моделированием с новым алгоритмом. Наиболее чётко в пользу метода EMPF_{low} говорят распределения по псевдобыстроте для второй струи, см. Рисунок 3 [A5]. Похожие выводы можно сделать и из спектров по $|\eta|$ для первой струи. Лучшая

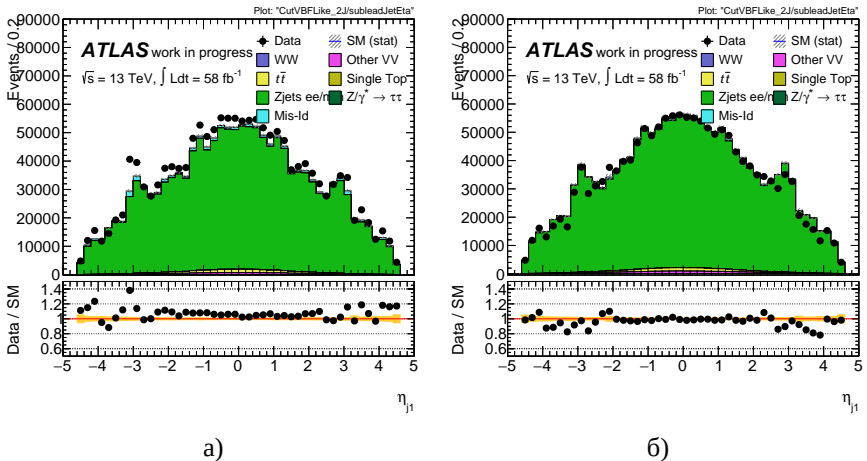


Рисунок 3 — Распределение по псевдобыстроте второй струи после предварительного отбора событий $Z \rightarrow ee$ 2018 г. с $N_{\text{jet}} \geq 2$ [A5]. Струи восстановлены алгоритмом EMT_{oro} (а). Струи восстановлены алгоритмом EMPF_{low} (б)

устойчивость нового алгоритма восстановления адронных струй, по сравнению со старым, к эффекту наложения событий также хорошо прослеживается на зависимостях средних значений различных характеристик струй от μ .

В третьем подразделе второго раздела второй главы рассказывается об анализе данных 2017 – 2018 гг. с применением алгоритма восстановления струй EMPFlow.

В качестве примера в Таблице 1 показано число событий после ограничения $|m_{\ell\ell} - m_Z| \leq 10$ ГэВ при разных множественностях струй для данных $Z \rightarrow ee$ 2017 г. [A5]. Оно воспроизводится моделированием почти с

N_{jet}	VV	топ	$Z \rightarrow ee$	$W \rightarrow e\nu$	Полный фон	Данные	Data/MC
Любое	195	22.9	15206	165	15589	15810	1.01
0	107	0.607	11122	137	11367	11643	1.02
1	51.3	4.3	2912	21.1	2989	2956	0.99
2	23.6	8.3	844	5.6	881	872	0.99
≥ 3	13.3	9.7	327	1.6	352	339	0.96

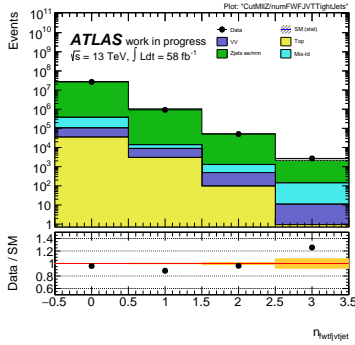
Таблица 1 — Число событий в тыс. с $|m_{\ell\ell} - m_Z| \leq 10$ ГэВ в зависимости от N_{jet} для конечного состояния $Z \rightarrow ee$ в данных 2017 г. [A5]

процентной точностью. Другим примером служит множественность струй в интервале $3.25 \leq |\eta| \leq 4.50$ для событий $Z \rightarrow \mu\mu$ 2018 г. (Рисунок 4(а) [A5]), которая неплохо описывается моделированием. Ещё одной демонстрацией качественного описания данных с помощью MC-моделирования является зависимость среднего значения числа струй с $2.75 \leq |\eta| \leq 3.25$ от величины μ для этих же данных (Рисунок 4(б) [A5]), причём согласие – вполне приличное даже при максимальных μ . Соответственно, можно ожидать, что алгоритм EMPFlow будет достаточно надёжно защищать от эффекта наложения событий и в текущем наборе данных 2022 – 2025 гг. при ещё более высокой светимости ЛНС, чем была достигнута в 2017 – 2018 гг.

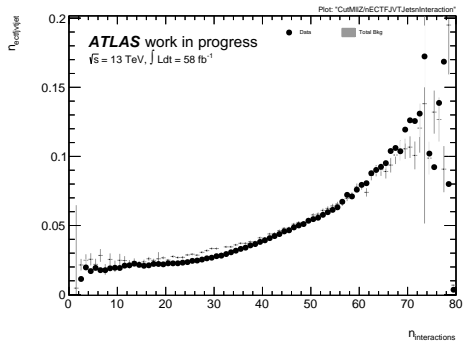
В четвёртом подразделе второго раздела второй главы представлены результаты изучения относительного вклада сторонних струй в зависимости от их p_T и η на основе моделирования фона. Показано, что струи с малым p_T и большим $|\eta|$ со значительной вероятностью не связаны с вершиной, где произошло основное (жёсткое) взаимодействие. Особенно велика эта вероятность для событий с одиночными Z -бозонами.

Третья глава посвящена изучению рождения бозона Хиггса СМ в канале распада $e\nu\mu\nu$.

В первом разделе третьей главы приводятся результаты анализа данных 2015 – 2016 гг. в контрольных областях основных фонов к сигналу от рождения бозона Хиггса [A1]. Эти фоны включают в себя различные процессы: нерезонансное рождение WW , парное ($t\bar{t}$) и одиночное (Wt) рождение топ-кварков и процессы Дрелла-Яна $Z \rightarrow \tau\tau$. Другие фоны связаны с W -jets и многоструйными событиями, в которых есть непрямые лептоны из распадов



а)



б)

Рисунок 4 — Множественность адронных струй в событиях $Z \rightarrow \mu\mu$ 2018 г. [A5]. Распределение по ней для струй с $3.25 \leq |\eta| \leq 4.50$ (а). Зависимость её средней величины от μ для струй с $2.75 \leq |\eta| \leq 3.25$ после требования $N_{\text{jet}} \geq 2$ (б)

тяжёлых кварков. События подразделялись на три категории в зависимости от N_{jet} с $p_T \geq 30$ ГэВ (восстановленных алгоритмом EMТоро): случаи $N_{\text{jet}} = 0$ и $N_{\text{jet}} = 1$ соответствовали, в основном, механизму рождения бозона Хиггса ggF, а категория $N_{\text{jet}} \geq 2$ относилась к механизму рождения VBF. Качественно восстановленные лептоны должны были быть разного аромата и заряда, причём для первого (второго) лептона использовались ограничения по поперечному импульсу $p_T \geq 22$ ГэВ ($p_T \geq 15$ ГэВ), соответственно. События с $N_{\text{jet}} = 0$, в которых недостающий поперечный импульс измерен очень неточно, подавлялись нижним ограничением на азимутальный угол между вектором E_T^{miss} и направлением движения лептонов ($\Delta\phi_{\ell\ell, E_T^{\text{miss}}} > \pi/2$). В сигнальных областях для подавления фона от топ-кварков вводился запрет на струи от b -кварков. Ограничения на суммарный поперечный импульс лептонов $p_T^{\ell\ell} \geq 30$ ГэВ и на инвариантную массу пары тау-лептонов, $m_{\tau\tau} - m_Z \geq 25$ ГэВ, уменьшали вклад от процессов $Z \rightarrow \tau\tau$. Для $N_{\text{jet}} \leq 1$ были дополнительно введены отборы $m_{\ell\ell} \leq 55$ ГэВ и $\Delta\phi_{\ell\ell} \leq 1.8$, основанные на специфической топологии событий от распада скалярного бозона Хиггса. При $N_{\text{jet}} \leq 1$ ключевой переменной для определения превышения сигнала над фоном служила поперечная масса m_T . В случае отбора $N_{\text{jet}} \geq 2$ использовался ансамбль деревьев решений (BDT) для разделения сигнала и фона, в который здесь входит и процесс рождения бозона Хиггса в механизме ggF. Выходной дискриминант BDT, D , отражал совместимость события с VBF-кинематикой.

Для нормировки предсказаний основных фонов: WW (только для случаев $N_{\text{jet}} = 0$ и $N_{\text{jet}} = 1$), $t\bar{t}$ и $Z \rightarrow \tau\tau$ использовались контрольные области; затем с помощью моделирования эти фоны пересчитывались на сигнальные области. Для измерения WW -фона применялись отборы, ортогональные по

переменной $m_{\ell\ell}$ по отношению к сигнальным областям. Для определения фона от топ-кварков вместо запрета на b -струю требовалось её наличие. Наконец, в случае $Z \rightarrow \tau\tau$ инвертировалось ограничение на $m_{\tau\tau}$ при ненулевом количестве струй, а в случае $N_{\text{jet}} = 0$ требовалось, чтобы $\Delta\phi_{\ell\ell} \geq 1.8$. На Рисунке 5 для примера показаны распределения в контрольной области $Z \rightarrow \tau\tau$ после подгонки. Наблюдается хорошее согласие данных и результатов моделирования.

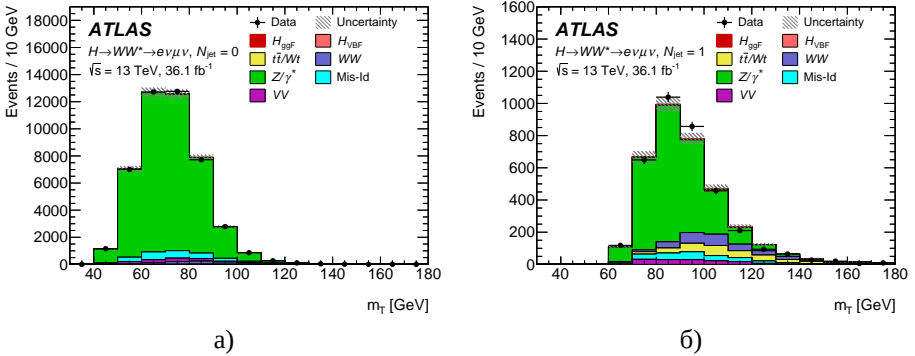


Рисунок 5 — Распределения по m_T после подгонки при $N_{\text{jet}} = 0$ (а) и $N_{\text{jet}} = 1$ (б) для фона от Z^*/γ^* в его контрольных областях [A1]. Заштрихованной полосой показана полная неопределённость смоделированных вкладов сигнала и фона

Во **втором разделе третьей главы** представлены результаты анализа полного образца событий 2015 – 2018 гг., при этом нами извлекалось полное сечение рождения бозона Хиггса в механизме слияния глюонов [A2]. Предварительный отбор событий практически не отличался от используемого ранее, но было добавлено ограничение $p_T^{\text{miss}} \geq 20$ ГэВ, которое существенно уменьшало вклад фонов с ложными лептонами. В отличие от [A1], струи восстанавливались с помощью более нового алгоритма EMPFlow. На Рисунке 6 показано распределение по множественности струй, которое хорошо описывается моделированием. Как и в [A1], образец событий делился на несколько частей в соответствии с числом струй N_{jet} , но была добавлена новая категория событий с $N_{\text{jet}} \geq 2$ для выделения дополнительной области сигнала с механизмом ggF.

Основные фоны измерялись в контрольных областях и пересчитывались на области сигнала с помощью моделирования. Для примера на Рисунке 7 показаны распределения в контрольных областях WW -фона и фона от топ-кварков для случая $N_{\text{jet}} = 0$. Данные и результаты моделирования хорошо согласуются.

В Таблице 2 показано число событий в сигнальных областях во всех трёх ggF-категориях. Распределения по m_T отдельно для категории $N_{\text{jet}} = 0$ и

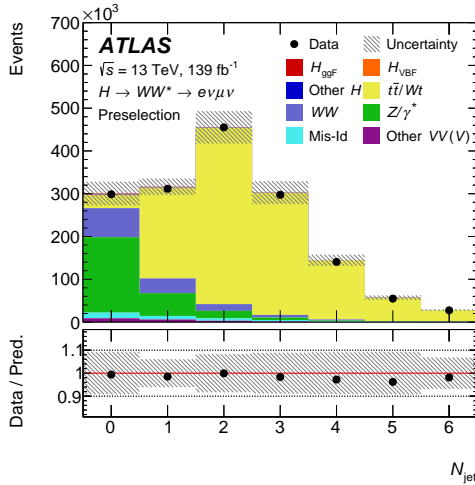
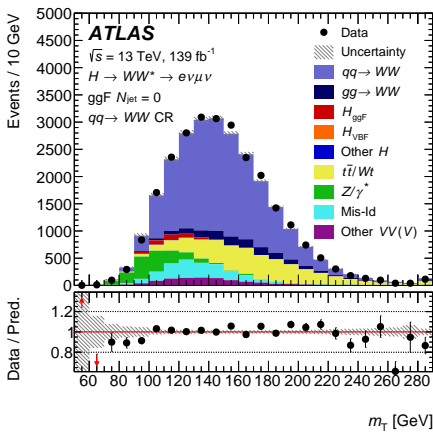
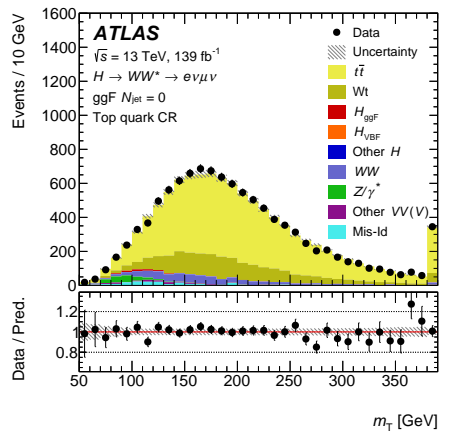


Рисунок 6 — Распределение струй с $p_T > 30 \text{ ГэВ}$ и $|\eta| < 4.5$ после предварительных отборов [A2]. Заштрихованная полоса показывает неопределённости



а)



б)

Рисунок 7 — Распределения по m_T после подгонки для контрольной области WW -фона (а) и фона от топ-кварков (б) для $N_{\text{jet}} = 0$ [A2]. Заштрихованная полоса показывает полную неопределённость при допущении рождении бозона Хиггса в СМ

Процесс	$N_{\text{jet}} = 0$ ggF	$N_{\text{jet}} = 1$ ggF	$N_{\text{jet}} \geq 2$ ggF
H_{ggF}	2100 ± 220	1100 ± 130	440 ± 90
H_{VBF}	23 ± 9	103 ± 30	46 ± 12
$VH+t\bar{t}H$	40 ± 20	55 ± 28	55 ± 27
WW	9700 ± 350	3500 ± 410	1500 ± 470
$t\bar{t}/Wt$	2200 ± 210	5300 ± 340	6100 ± 500
Z/γ^*	140 ± 50	280 ± 40	930 ± 70
Другие VV	1400 ± 130	840 ± 100	470 ± 90
Mis-Id	1200 ± 130	720 ± 90	470 ± 50
Всего	$16\,770 \pm 130$	$11\,940 \pm 110$	$10\,030 \pm 100$
Обнаружено	16 726	11 917	9 982

Таблица 2 — Количество реконструированных и предсказанных событий после подгонки во всех трёх ggF-категориях [A2]

суммарная комбинация по всем категориям ggF показаны на Рисунке 8.

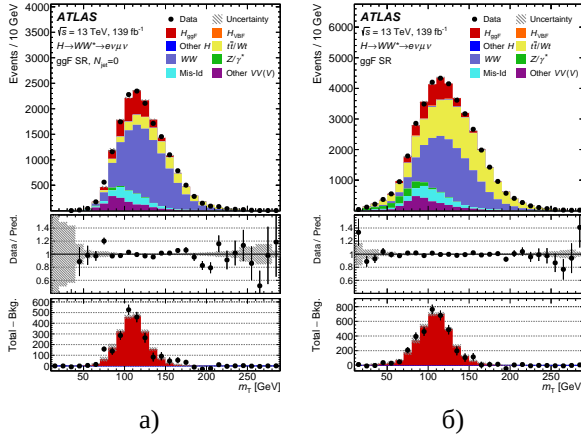


Рисунок 8 — Распределения по m_T в сигнальной области ggF $N_{\text{jet}} = 0$ (а) и комбинированное по всем трём сигнальным областям ggF (б) [A2]

Нормированное на СМ сечение рождения при массе бозона Хиггса $m_H = 125.09$ ГэВ в распаде $H \rightarrow WW^*$ оказалось равным:

$$\mu_{\text{ggF}} = 1.15^{+0.16}_{-0.15}.$$

Измеренная абсолютная величина сечения, помноженная на относительную вероятность распада, $\sigma_{\text{ggF}} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*}$ составила:

$$\sigma_{\text{ggF}} \cdot \mathcal{B}_{H \rightarrow WW^*} = 12.0 \pm 1.4 \text{ пб.}$$

в сравнении с предсказанной в СМ величиной 10.4 ± 0.5 пб [9]. Таким образом, сечение рождения бозона Хиггса в основном механизме рождения ggF в канале распада на WW^* было измерено с точностью 12%, а само сечение совместимо с СМ. Примерно такая же точность была достигнута и в эксперименте CMS на сходной статистике [10], но с дополнительным использованием конечных состояний с двумя мюонами и двумя электронами.

Четвёртая глава посвящена поиску тяжёлого бозона Хиггса и других бозонных резонансов, распадающихся на пару W -бозонов.

В **первом разделе четвёртой главы** кратко описывается анализ для конечного состояния с электроном и мюоном, который послужил основой для аналогичного исследования, проведённого автором для конечного состояния с двумя электронами или двумя мюонами. По сравнению со случаем бозона Хиггса СМ (с массой 125 ГэВ), были существенно ужесточены ограничения снизу на поперечный импульс первого ($p_T \geq 45$ ГэВ) и второго ($p_T \geq 30$ ГэВ) лептонов, а также были введены ограничения снизу $m_{\ell\ell} \geq 55$ ГэВ, поскольку речь идёт о широком диапазоне масс резонанса от 200 ГэВ до нескольких ТэВ, а также $\Delta\eta_{\ell\ell} \leq 1.8$. Запрет на b -струю был нужен для подавления фона от процессов с топ-кварками. Затем область сигнала делилась на три ортогональные категории в зависимости от числа струй в событии. События с $N_{\text{jet}} = 1$, в которых $\eta_j > 2.4$ и $\Delta\eta_{\ell j} > 1.75$, где $\Delta\eta_{\ell j}$ – минимальная разница псевдобыстрот между одним из лептонов и струей, относятся к VBF1J SR. События с $N_{\text{jet}} \geq 2$, в которых $\Delta y_{jj} > 4.0$ и $m_{jj} > 500$ ГэВ относятся к SR области VBF2J. Остальные события со струями, не прошедшие этот отбор, или события без струй принадлежат области сигнала ggF, инклюзивной по числу струй. Окончательным дискриминантом во всех сигнальных областях служила поперечная масса m_T . В контрольной области для фона от топ-кварков для случая ggF использовались те же ограничения, что и в соответствующей области сигнала, но вместо запрета на b -струю требовалось наличие ровно одной b -струи. Из-за малого количества событий в двух VBF-категориях использовалась объединённая контрольная область, здесь отбор был аналогичен соответствующим сигнальным областям VBF, но было необходимо наличие хотя бы одной b -струи вместо запрета на неё. В контрольной области WW -фона для случая ggF применялись те же отборы, что и в сигнальной области за исключением ограничения по $\Delta\eta_{\ell\ell}$, которое инвертировалось. В области WW -фона в случае VBF1J использовались существенно более мягкие ограничения на некоторые переменные, чем в сигнальной, а её ортогональность с сигнальной областью достигалась отбором событий, удовлетворяющих хотя бы одно из двух инвертированных требований: $\Delta\eta_{\ell\ell} > 1.8$, либо $10 \text{ ГэВ} \leq m_{\ell\ell} \leq 55 \text{ ГэВ}$. Для области VBF2J сконструировать контрольную область WW -фона оказалось

сложно, и он оценивался напрямую из результатов моделирования. Было проверено, что во всех контрольных областях наблюдается хорошее согласие данных с МС-моделированием и были определены коэффициенты пересчёта на соответствующие сигнальные области.

В распределениях по m_T в сигнальных областях не обнаружено значимого превышения над фоном, поэтому были вычислены верхние пределы на 95%-ном уровне достоверности (CL_s) для $\sigma_H \times B(H \rightarrow WW^*)$ в зависимости от m_H для бозона Хиггса для разных моделей. Для примера в сценарии NWA величины сечений выше 7.2 пб при 200 ГэВ и 0.0048 пб при 3.8 ТэВ были исключены на 95% CL_s для механизма рождения ggF и 0.57 пб и 0.0045 пб для механизма VBF [7]. Следует отметить, что в широком диапазоне масс ожидаемые пределы для разных моделей отличаются на фактор не больший, чем 2 – 2.5. Близость результатов в некоторой степени демонстрирует модельную независимость проведённого анализа.

Наконец, обсуждаются перспективы поиска тяжёлого бозона Хиггса на HL-LHC на основе специального моделирования сигнала, проведённого автором.

Во **втором разделе четвёртой главы** рассматривается анализ конечного состояния с двумя электронами или двумя мюонами [A6]–[A7].

Отличие от состояния с электроном и мюоном, здесь существенен большой фон от событий Дрелла-Яна $Z^*/\gamma^* \rightarrow ee/\mu\mu$, число которых составляет около 100 млн на полной статистике данных при 13 ТэВ. Благодаря предложенной автором специальной схеме сжатия входных данных для программы анализа путём ограничений $S(E_T^{\text{miss}}) > 3$ и $p_T^{\text{miss}} > 30$ ГэВ, в дополнение к уже упоминавшимся отборам по поперечному импульсу лептонов, удалось уменьшить их объём в 10 раз. Здесь $S(E_T^{\text{miss}})$ – значимость недостающей поперечной энергии, которая оценивается на основе методов максимального правдоподобия с использованием смоделированных выборок так, чтобы отделить события с нейтрино с большим p_T от событий, в которых ненулевая E_T^{miss} связана с инструментальными эффектами. Поскольку отбор событий в канале $e\nu\mu\nu$ уже был оптимизирован для подавления такой же композиции фонов, что и в канале $e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$, за исключением $Z^*/\gamma^* \rightarrow \ell\ell$, мы его заимствовали из того исследования, добавив требования $p_T^{\text{miss}} > 40$ ГэВ и $|m_{\ell\ell} - m_Z| > 25$ ГэВ. Затем применялись специфические ограничения $S(E_T^{\text{miss}}) > 7$ (6, 5) и $p_T^{\text{tot}} < 50$ (30, 20) ГэВ для областей ggF (VBF1J, VBF2J), соответственно. Для снижения вклада $R \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ дополнительно требовалось, чтобы $|\Delta\phi_{\ell\ell}| > 1.8$. Для нормировки фона от процессов Дрелла-Яна автором были предложены контрольные области, ортогональные сигнальным областям ggF, VBF1J и VBF2J, при этом события выбирались в диапазоне $|m_{\ell\ell} - m_Z| \leq 25$ ГэВ. Нормировочные коэффициенты для этих областей составили $NF = 1.08 \pm 0.01$, 1.01 ± 0.03 и 0.91 ± 0.04 [A6]. В Таблице 3 показаны числа наблюдаемых и смоделированных событий в указанных контрольных областях.

	ggF	VBF1J	VBF2J
VV	56600 ± 200	2000 ± 50	600 ± 20
Top	10800	283 ± 4	265 ± 3
Z/γ^*	958000 ± 4000	33100 ± 700	8630 ± 190
Mis-ID	6600 ± 500	130 ± 100	18 ± 28
Полный фон	1032000 ± 4000	35510 ± 700	9520 ± 200
Данные	1031850	35538	9512

Таблица 3 — Количество событий в контрольных областях процессов $Z^*/\gamma^* \rightarrow \ell\ell$ со статистическими неопределённостями [A6]

Было проверено, что распределения по ключевым переменным в этих областях хорошо описываются моделированием. На Рисунке 9 для примера показаны спектры по m_T . В области сигнала ggF (VBF1J, VBF2J) было

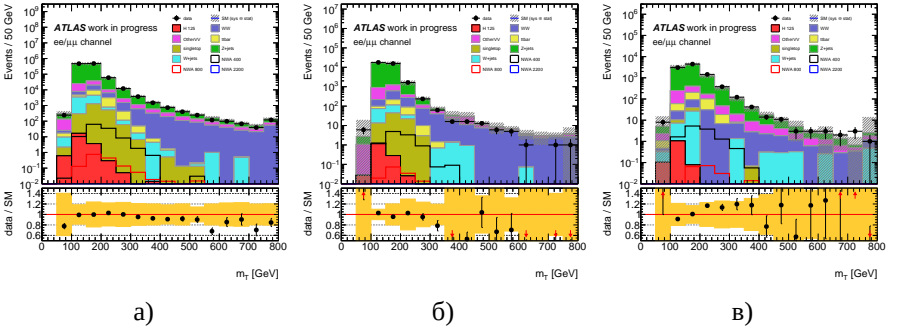
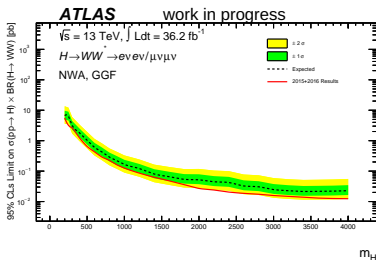
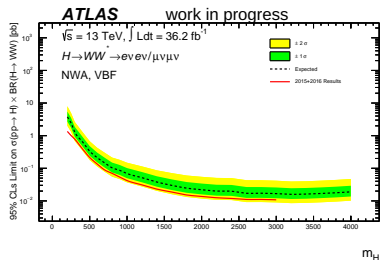


Рисунок 9 — Распределения по m_T в контрольных областях фона от процессов Дрелла-Яна: ggF (а), VBF1J (б) и VBF2J (в) [A6]

обнаружено около 15090 (409, 282) событий фона, соответственно. На Рисунке 10 для примера приведены ожидаемые верхние пределы на сечения рождения тяжёлого бозона Хиггса, ограниченные набором данных 2015 – 2016 гг., для модели NWA, отдельно для его рождения в механизмах ggF и VBF [A6]. Они получаются в среднем лишь вдвое хуже, чем полученные на той же статистике, но для конечного состояния $e\nu\mu\nu$. Поэтому благодаря объединению каналов $e\nu\mu\nu$ с $e\nu e\nu$ и $\mu\nu\mu\nu$ можно будет заметно улучшить упомянутые верхние пределы. Аналогичные пределы были подсчитаны автором для скалярных, векторных и тензорных резонансов в рамках соответствующих моделей. Близость результатов в некоторой степени демонстрирует модельную независимость проведённого анализа.



а)



б)

Рисунок 10 — Ожидаемые верхние пределы на 95% CL_s для $\sigma \times \mathcal{B}(H \rightarrow WW)$ для тяжёлого бозона Хиггса в модели NWA для моды рождения ggF (а) и VBF (б) [A6]

В **заключении** приводятся основные результаты работы, которые сводятся к следующему.

1. Разработан [A8] и успешно применён пакет программ для работы с профильными гистограммами для изучения адронных струй в событиях сигнала от бозона Хиггса и фонов в рамках информационной среды рабочей группы HWW сотрудничества ATLAS [A3].
2. Исследованы свойства адронных струй в событиях с Z -бозонами для задач изучения свойств бозона Хиггса SM и поиска тяжёлого бозона Хиггса на данных 2015 – 2016 г. при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [A4].
3. Это исследование расширено на данные 2017 – 2018 г., набранные при повышенной светимости LHC [A5].
4. Получены спектры по поперечной массе, разнице быстрот адронных струй и нормировочные коэффициенты в контрольных областях фонов для канала распада бозона Хиггса $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ на данных 2015 – 2016 гг. [A1].
5. Измерены распределения по числу струй, по инвариантной массе лептонов и разнице их азимутальных углов, получено полное число событий после отборов, распределения по поперечной массе в контрольных и сигнальной областях и сечение в канале распада $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ на данных 2015 – 2018 гг. в основном механизме рождения [A2].
6. Оценены ожидаемые верхние пределы на сечения рождения тяжёлых резонансов в канале распада $R \rightarrow WW \rightarrow e\nu e\nu$ и $R \rightarrow WW \rightarrow \mu\nu\mu\nu$ при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ с учётом экспериментальных систематических погрешностей с оптимизированными автором критериями отбора полезных событий [A6; A7].

Публикации автора по теме диссертации

- A1. G. Aad..., A. Gavrilyuk [et al.] (ATLAS Collaboration). Measurements of gluon-gluon fusion and vector-boson fusion Higgs boson production cross-sections in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector [Text] // Phys. Lett. B. – 2019. – Vol. 789. – P. 508. – arXiv: 1808.09054. – URL: <https://cds.cern.ch/record/2636382>.
- A2. G. Aad..., A. Gavrilyuk [et al.] (ATLAS Collaboration). Measurements of Higgs boson production by gluon-gluon fusion and vector-boson fusion using $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector [Text] // Phys. Rev. D. – 2023. – Aug. – Vol. 108, issue 3. – P. 032005. – arXiv: 2207.00338 [hep-ex]. – URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.108.032005>.
- A3. Гаврилюк А. А., Рамакоти Е. Н., Цукерман И. И. Наложение адронных струй и поиск тяжелого бозона Хиггса в канале распада WW в pp столкновениях при 13 ТэВ в эксперименте АТЛАС на БАК [Текст] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 5. – С. 497.
- A4. Gavrilyuk A. A., Ramakoti E. N., Tsukerman I. I. Z-Boson Control Region and Search for a Heavy Higgs Boson in $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ Decay Channel in Proton—Proton Collisions at 13 TeV with the ATLAS Experiment at LHC [Text] // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Vol. 82, no. 12. – P. 1701.
- A5. Gavrilyuk A. A., Ramakoti E. N., Tsukerman I. I. Study of Events with Two Leptons in the Final State to Investigate Properties of the Standard Model Higgs Boson and Search for a Heavy Higgs Boson in the $h/H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ Decay in pp Collisions at 13 TeV with the ATLAS Detector at the LHC [Text] // Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Vol. 84, no. 9. – P. 1660.
- A6. Gavrilyuk A. A., Ramakoti E. N., Tsukerman I. I. Search for $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ Decays of a Heavy Higgs Boson Produced in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV Using a 139-fb^{-1} Event Sample Recorded by the ATLAS Experiment [Text] // Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Vol. 84, no. 11. – P. 1914.
- A7. Gavrilyuk A. A., Ramakoti E. N., Tsukerman I. I. Search for the Standard Model Higgs Boson and a Heavy Resonance in the $WW^* \rightarrow (e\nu e\nu + \mu\nu\mu\nu)$ Decay Channel in the ATLAS Experiment [Text] // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. – Vol. 85, no. 9. – P. 1587.
- A8. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программный модуль “TQProfiles v1.1” / А. А. Гаврилюк, И. И. Цукерман ; Федеральное государственное бюджетное учреждение “Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”. – № 2020662440 ; заявл. 30.09.2020 ; опубл. 14.10.2020, 2020662440 (Рос. Федерация).

Список литературы

1. *ATLAS Collaboration*. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC [Text] // *Phys. Lett.* – 2012. – Vol. B716. – P. 1.
2. *CMS Collaboration*. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC [Text] // *Phys. Lett.* – 2012. – Vol. B716. – P. 30.
3. *ATLAS Collaboration*. Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data [Text] // *Phys. Lett.* – 2013. – Vol. B726. – P. 120.
4. *CMS Collaboration*. Constraints on the spin-parity and anomalous HVV couplings of the Higgs boson in proton collisions at 7 and 8 TeV [Text] // *Phys. Rev.* – 2015. – Vol. D92. – P. 012004.
5. *ATLAS Collaboration*. A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery [Text] // *Nature.* – 2022. – Vol. 607. – P. 52.
6. *CMS Collaboration*. A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery [Text] // *Nature.* – 2022. – Vol. 607. – P. 60.
7. *ATLAS Collaboration*. Search for heavy resonances in the decay channel $W^+W^- \rightarrow e\nu\mu\nu$ in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using 139 fb^{-1} of data with the ATLAS detector [Text] : tech. rep. / CERN. – Geneva, 2022. – ATLAS-CONF-2022-066. – URL: <https://cds.cern.ch/record/2842518>.
8. *ATLAS Collaboration*. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider [Text] // *Journal of Instrumentation.* – 2008. – Vol. 3. – S08003.
9. *De Florian D.* [et al.]. Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector [Text] : tech. rep. / CERN. – Geneva, 2016. – ArXiv:1610.07922.
10. *CMS Collaboration*. Measurements of the Higgs boson production cross section and couplings in the W boson pair decay channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV [Text] // *Eur. Phys. J. C.* – 2023. – Vol. 83. – P. 667.