

На правах рукописи

Рыжов Андрей Валерьевич

**Исследование парного рождения векторных бозонов  
с последующим распадом на заряженные лептоны и адроны  
в эксперименте ATLAS**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Протвино 2021

УДК 539.12

Работа выполнена в ФГБУ «Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт» (г. Протвино).

Научный руководитель – кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ, А. Г. Мягков.

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ (г. Москва), начальник лаборатории, В. Б. Гаврилов; кандидат физ.-мат. наук, НИИЯФ МГУ (г. Москва), заведующий лабораторией, Л. В. Дудко.

Ведущая организация – Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна).

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [http://www.ihep.su/pages/main/6582/Ryzhov\\_details/](http://www.ihep.su/pages/main/6582/Ryzhov_details/)  
НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 201.004.01

Н. Н. Прокопенко

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования и степень её разработанности.** Современное состояние физики элементарных частиц, её развитие и достижения неразрывно связаны со Стандартной моделью (Standard Model, SM) — теорией, которая классифицирует все известные частицы, а также описывает сильное и электрослабое взаимодействия между ними. Триумфом SM считается открытие переносчиков слабого взаимодействия — векторных  $W^\pm$ - и  $Z$ -бозонов — Европейской Организацией по Ядерным Исследованиям (ЦЕРН) в 1983 году [1]. Это событие отмечено Нобелевской премией по физике 1984 года, а теория получила признание и поддержку научного сообщества. Завершающим экспериментальным подтверждением Стандартной модели стало обнаружение в 2012 году на детекторах ATLAS и CMS Большого адронного коллайдера (Large Hadron Collider, LHC) бозона Хиггса — последнего недостающего элемента этой теории, ответственного за возникновение масс у фундаментальных частиц [2; 3].

Несмотря на поразительный успех SM в описании экспериментальных данных, целый ряд важных вопросов об окружающем нас мире остается без ответа. Например, в рамках этой теории невозможно объяснить существенный дисбаланс между материей и антиматерией во Вселенной, решить проблемы иерархии (большого разброса) энергетических масштабов взаимодействий и фермионных масс, определить происхождение тёмной материи и тёмной энергии, описать гравитационное взаимодействие и т. д.

Проверка новых теоретических моделей, выходящих за рамки SM и отвечающих на заданные вопросы, т. н. моделей новой (нестандартной) физики, является приоритетным направлением в экспериментах на LHC. Некоторые из этих моделей [4—6] предсказывают существование новых массивных резонансов  $X$ , распадающихся на пару бозонов  $VV$  ( $V = Z, W^\pm$ ), т. н. дибозонную систему. Также прогнозируется

нерезонансное проявление новой физики через изменение сечения процесса рассеяния векторных бозонов  $VV \rightarrow VV$  (Vector Boson Scattering, VBS), предсказанного в электрослабом секторе SM [7; 8]. Таким образом, для поиска новой физики на LHC особый интерес представляет исследование парного рождения векторных бозонов.

Данная диссертация посвящена изучению рождения дибозонных состояний с последующим их распадом по полулептонному каналу, в котором  $Z$ -бозон распадается на лёгкие заряженные лептоны  $\ell\bar{\ell}$  (пару мюонов  $\mu^+\mu^-$  или электрон–позитрон  $e^+e^-$ ), а второй  $Z$ - или  $W^\pm$ -бозон распадается по адронной моде (на пару кварк–антикварк  $q\bar{q}$ ). Таким образом, изучаются распады пар векторных бозонов  $ZW \rightarrow \ell\ell q\bar{q}$  и  $ZZ \rightarrow \ell\ell q\bar{q}$  (в записи которых обозначение античастиц для простоты опускается).

Поиски новых частиц в канале распада  $X \rightarrow ZV \rightarrow \ell\ell q\bar{q}$  осуществлялись в экспериментах ATLAS и CMS в ходе первого сеанса работы LHC в 2009–2013 годах, т. н. Run-1 [9; 10]. Несмотря на то, что резонансы не обнаружены, результатом стали экспериментальные ограничения, накладываемые на теоретические модели новой физики, которые позволили уменьшить спектр возможных значений параметров этих моделей. Поиски новых резонансов продолжились во втором сеансе набора данных в 2015–2018 годах, т. н. Run-2, и предоставляют хорошую возможность для проверки моделей, расширяющих SM, за счёт возросшей энергии протон-протонных ( $pp$ ) столкновений и светимости LHC, недостижимых на других ускорителях.

Обе коллаборации ATLAS и CMS проводили поиск событий процесса VBS, предсказанного Стандартной моделью. Отличительной чертой этого процесса является наличие помимо электрослабого рождения  $VV$  двух дополнительных адронных струй  $jj$ , разлетающихся в противоположных направлениях рядом с осью пучка протонов. Измерения сечения электрослабого рождения  $VVjj$  осуществлялись в полностью лептонных конечных состояниях по данным сеанса Run-1 и хорошо согласовывались с предсказаниями SM [11; 12]. На данных 2015–2016 годов сеанса Run-2 удалось достичь статистической значимости наблюдения сигнала в пять стандартных отклонений ( $5\sigma$ ), что позволяет убедительно утверждать о существовании процесса VBS в рамках SM [13; 14]. Следующий важный шаг — выполнить первое измерение сечения электрослабого

рождения  $VVjj$  во всех полулептонных конечных состояниях, включая канал  $ZV \rightarrow \ell\ell qq$ . За счёт большей статистики в области высоких масс дибозонной системы, полулептонные каналы потенциально более чувствительны к проявлениям новой физики по сравнению с лептонными [15].

Увеличение светимости коллайдера в наборе данных сеанса Run-2 накладывает более жёсткие требования на триггерное подавление событий, не связанных с исследуемыми процессами (т. н. фоновых событий), без заметного уменьшения эффективности регистрации «полезных» событий. Поэтому перед вторым сеансом проведены работы по модернизации триггеров установки ATLAS, в частности, введён в эксплуатацию новый мюонный триггер адронного калориметра (L1 Tile-Muon). Триггер использует информацию как с мюонного спектрометра, так и с адронного калориметра, что в результате позволяет усилить подавление фоновых мюонных событий.

**Цели и задачи исследования.** Основные цели данной работы:

- Провести поиск тяжёлых резонансов и наложить экспериментальные ограничения на теоретические модели в канале распада  $X \rightarrow ZV \rightarrow \ell\ell qq$  на данных, накопленных экспериментом ATLAS в течение сеанса Run-2.
- Измерить сечение электрослабого рождения  $ZVjj$  с последующим распадом  $ZV \rightarrow \ell\ell qq$  на данных 2015–2016 годов.

Сопутствующая цель — обеспечить триггерное подавление ложных мюонных событий в передних кинематических областях детектора ATLAS во время сеанса Run-2 путем введения в эксплуатацию L1 Tile-Muon триггера.

Для достижения поставленных целей автором решены следующие задачи:

1. Разработано программное обеспечение (ПО) в системе триггера и сбора данных (Trigger and Data Acquisition, TDAQ) установки ATLAS, которое обеспечивает управление и интеграцию новой электронной платы (Tile-Muon Digitizer Board, TMDb) со всей триггерной системой детектора ATLAS.

2. Создан онлайн декодирующий данных и триггерных решений, вырабатываемых TMDb, для обеспечения мониторинга стабильности функционирования и быстрой настройки L1 Tile-Muon триггера.
3. Используя разработанное триггерное ПО, протестирована, настроена и введена в эксплуатацию новая электроника L1 Tile-Muon триггера, установленная во время модернизации адронного калориметра перед сеансом Run-2.
4. Создано программное обеспечение для анализа данных установки ATLAS, с помощью которого выделены события распада  $ZV \rightarrow llqq$ . Оптимизированы критерии отбора объектов, обеспечивающие высокую эффективность реконструкции и идентификации электронов, мюонов и адронных струй.
5. Используя данное ПО для поиска массивных дибозонных резонансов и поиска событий процесса VBS в канале распада  $ZV \rightarrow llqq$ , сформулированы и оптимизированы критерии отбора событий, выбраны методики категоризации событий по сигнальным и контрольным областям.
6. Произведена оценка вклада фоновых процессов, предсказываемых SM. Для этого смоделированные методом Монте-Карло (Monte Carlo, MC) фоновые события проходили отбор с помощью разработанного ПО.
7. С целью увеличения эффективности разделения сигнала VBS и фоновых процессов разработан и оптимизирован классификатор событий, основанный на одном из методов машинного обучения — ансамбле деревьев решений (Boosted Decision Trees, BDT).
8. Оценена эффективность работы классификатора BDT. В результате его применения ожидаемая статистическая значимость предсказанного сигнала повышается с  $1.5\sigma$  до  $2.5\sigma$ .
9. Выполнена оценка систематических погрешностей MC моделирования фоновых и сигнальных процессов.
10. Проведено сравнение распределений событий по кинематическим переменным между экспериментальными данными и смоделированными методом MC фоновыми процессами.

11. Ввиду отсутствия статистически значимых отклонений, для модели тяжёлого векторного триплета [5], двухдублетной хиггсовской модели [4] и расширенной модели Рэндалл–Сандрума [6] установлены верхние пределы на сечения рождения массивных резонансов в дибозонном канале распада  $\sigma(pp \rightarrow X \rightarrow ZV)$  с полулептонным конечным состоянием, а также установлены нижние пределы по массе на существование таких резонансов на уровне достоверности 95 %.
12. Осуществлено измерение сечения электрослабого рождения  $VVjj$  по всем полулептонным конечным состояниям  $VV$ , включая канал распада  $ZV \rightarrow llqq$ . Статистическая значимость наблюдаемого сигнала составила 2.7 стандартных отклонений.

**Научная новизна.** Впервые проведены поиски массивных дибозонных резонансов с конечным состоянием  $llqq$  в эксперименте ATLAS на данных сеанса Run-2, полученных в  $pp$ -столкновениях при рекордно высоких энергиях в системе центра масс  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ на статистике, соответствующей интегральной светимости  $139 \text{ фб}^{-1}$ . Это позволило установить более жёсткие ограничения на сечения и массы резонансов по сравнению с результатами предыдущих анализов, проведенных на данных сеанса Run-1 в экспериментах ATLAS и CMS [16–18]. Полученные оценки пределов на сечения и массы резонансов являются наилучшими из существующих на данный момент.

Поиск событий VBS выполнен на статистике, набранной за период 2015–2016 годов, что соответствует интегральной светимости  $36 \text{ фб}^{-1}$ . Впервые измерено сечение электрослабого рождения  $ZVjj$  с последующим распадом  $ZV \rightarrow llqq$  в фазовом объёме, доступном эксперименту для измерения (fiducial, fid):

$$\sigma_{EW ZVjj}^{\text{fid,obs}} = 14.2 \pm 3.6(\text{стат.})_{-4.2}^{+4.6}(\text{сист.}) \text{ фб},$$

которое находится в согласии с предсказаниями SM:

$$\sigma_{EW ZVjj}^{\text{fid,SM}} = 7.2 \pm 0.4(\text{теор.}) \text{ фб}.$$

После объединения полученных результатов с данными каналов распада дибозонов, содержащих нейтрино  $\nu$  ( $WV \rightarrow \nu qq$  и  $ZV \rightarrow \nu \nu qq$ ), впервые осуществлено измерение сечения электрослабого рождения  $VVjj$  по

всем полулептонным конечным состояниям:

$$\sigma_{EW VVjj}^{\text{fid,obs}} = 45.1 \pm 8.6(\text{стат.})_{-14.6}^{+15.9}(\text{сист.}) \text{ фб},$$

что хорошо согласуется в пределах погрешности с сечением SM:

$$\sigma_{EW VVjj}^{\text{fid,SM}} = 43.0 \pm 2.4(\text{теор.}) \text{ фб}.$$

Мюонный триггер адронного калориметра эксперимента ATLAS успешно введен в эксплуатацию в 2015 году. Триггер эффективно и стабильно функционировал на протяжении всего второго сеанса работы LHC до конца 2018 года в условиях высокой светимости и большой множественности наложенных протонных взаимодействий.

**Теоретическая и практическая значимость.** Новый мюонный триггер адронного калориметра эффективно подавляет фон в передних кинематических областях детектора ATLAS. Усовершенствованный триггерный отбор мюонных событий положительным образом влияет на точность результатов всех анализов данных, в которых необходима реконструкция мюонов.

Результаты поисков дибозонных резонансов, изложенные в данной диссертации, фактически являются проверкой модели тяжёлого векторного триплета, двухдублетной хиггсовской модели и расширенной модели Рэндалл-Сандрума и выступают ориентирами при дальнейшем развитии теорий таких классов. Кроме того, пределы на сечение рождения резонанса можно улучшить, объединяя разные моды распада и тем самым повышая статистику. Полученные на данных 2015–2016 годов результаты поисков  $X \rightarrow ZV \rightarrow \ell\ell qq$  были использованы для совместного анализа с 13 другими каналами распадов массивных резонансов [19].

Проведённое в данной работе измерение сечения электрослабого рождения  $VVjj$  является уникальным. Оно позволяет проверить предсказания SM для одного из самых интересных процессов в современной экспериментальной физике. Методика отбора событий и их классификация, разработанная в ходе поиска процесса VBS, легла в основу дальнейших аналогичных работ коллаборации ATLAS на полной статистике сеанса Run-2.

Разработанные автором компьютерные программы включены в стандартные пакеты ПО эксперимента ATLAS и хранятся во внутренних



репозиториях коллаборации. Триггерное ПО непосредственно используется для работы детектора, а все прикладные программы применяются членами коллаборации при анализе данных.

**Методология и методы исследования.** Экспериментальные данные, набранные детектором ATLAS в 2015–2018 годах, анализировались и сравнивались с результатами компьютерного моделирования методом Монте-Карло. Проверка статистической совместимости экспериментальных данных с предсказаниями SM и определение верхних пределов на сечения рождения тяжёлых резонансов выполнялись в рамках частотного подхода.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты триггерного подавления ложных мюонных событий в передних кинематических областях детектора ATLAS за счёт введения в эксплуатацию L1 Tile-Muon триггера.
2. Результаты оптимизации критериев отбора событий, а также классификации событий по сигнальным и контрольным областям для поиска тяжёлых дибозонных резонансов и поиска событий процесса VBS в канале распада  $ZV \rightarrow \ell\ell q\bar{q}$ .
3. Результаты работы классификатора событий BDT, который усиливает разделение сигнала VBS от фоновых процессов.
4. Результаты оценки систематических погрешностей MC моделирования фоновых и сигнальных процессов.
5. Результаты статистического анализа по оценке степени согласованности между экспериментальными данными и предсказаниями Стандартной модели.
6. Верхние пределы на сечения  $\sigma(pp \rightarrow X \rightarrow ZV)$  в полулептонных модах распада дибозонов и нижние пределы на массы  $X$ , при которых существование резонансов с меньшими массами исключено, на уровне достоверности 95 % для модели тяжёлого векторного триплета, двухдублетной хиггсовской модели и расширенной модели Рэндалл-Сандрума.
7. Результаты измерения сечения электрослабого рождения  $VVjj$  по всем полулептонным конечным состояниям, и, в частности, результаты измерения в канале  $ZV \rightarrow \ell\ell q\bar{q}$ .

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность представленных в диссертации результатов обеспечивается надлежащим функционированием всех подсистем детектора ATLAS на протяжении всего сеанса Run-2, использованием стандартных пакетов ПО эксперимента ATLAS, а также согласованностью результатов с теоретическими расчётами и с аналогичными измерениями, проведенными в эксперименте CMS [18].

Промежуточные результаты многократно докладывались автором и обсуждались на совещаниях рабочих групп «Экзотика» и «Электрослабый сектор SM» коллаборации ATLAS, семинарах НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, а также на совещаниях российских институтов, входящих в коллаборацию ATLAS.

Основные результаты данной работы были представлены автором на профильных международных конференциях по физике элементарных частиц: «Topical Workshop on Electronics for Particle Physics» (TWEPP 2016; 26–30 сентября 2016 г., Карлсруэ, Германия) и «The XXIII International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory» (QFTHEP 2017; 26 июня – 3 июля 2017 г., Ярославль, Россия).

Полученные автором результаты также неоднократно докладывались членами коллаборации ATLAS на различных международных конференциях.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 9 работах, из которых удовлетворяют требованиям ВАК 6 статей в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus.

**Личный вклад.** Начиная с 2014 года автор принимал активное участие в работе группы L1 Tile-Muon триггера эксперимента ATLAS. Непосредственно им разработано программное обеспечение по контролю и управлению TMDB в системе TDAQ, необходимое для ввода L1 Tile-Muon триггера в эксплуатацию. Для обеспечения бесперебойной проверки стабильности работы триггера автором создан онлайн декодировщик данных и триггерных решений, вырабатываемых TMDB. С момента ввода триггера в эксплуатацию автор осуществлял поддержку ПО и сопутствующей инфраструктуры на протяжении всего сеанса Run-2 в течение 2015–2018 годов.

Начиная с 2015 года автор активно участвовал в работе международной группы учёных над анализами данных по поиску резонансов в канале распада  $X \rightarrow ZV \rightarrow \ell\ell qq$ . По мере набора статистики сеанса Run-2 и при последовательном совершенствовании анализа были обработаны данные за 2015 год, 2015–2016 и 2015–2018 года. Автором разработано основное ПО анализов данных и непосредственно выполнены все ключевые этапы работы: подготовка смоделированных методом Монте-Карло наборов данных, поиск оптимальных критериев реконструкции объектов и отбора событий, оценка систематических неопределённостей, проверка статистической совместимости экспериментальных данных с предсказаниями SM. Также автором дополнительно протестирован и оптимизирован алгоритм поиска адронных струй большого радиуса, образовавшихся вследствие распада  $Z$ -бозона на пару  $b$ -кварков.

В период 2017–2019 годов автор работал в группе по поиску процесса VBS в полуплептонных конечных состояниях и отвечал за канал  $\ell\ell qq$ . Основная деятельность была сосредоточена на выделении сигнала VBS: выборе критериев отбора событий, а также разработке, обучении и оптимизации классификатора событий BDT.

Кроме этого, во время набора данных сеанса Run-2 автор участвовал в сменных дежурствах по контролю за функционированием детектора ATLAS, впоследствии — в дежурствах по оценке качества данных, набранных адронным калориметром эксперимента ATLAS.

Работы в эксперименте ATLAS выполнены и опубликованы при определяющем вкладе автора. Автор является одним из основных специалистов в соответствующих исследованиях коллаборации ATLAS, редактором внутренней документации анализов данных и опубликованных научных статей.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и четырёх приложений. Полный объём диссертации составляет 180 страниц, включая 78 рисунков и 21 таблицу. Список литературы содержит 155 наименований.

## Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и раскрыта степень её разработанности. Поставлены цели и задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены данные о степени достоверности и апробации результатов, сведения о публикациях, а также информация о личном вкладе автора. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен краткий обзор SM и моделей новой физики, в которых предсказывается появление новых частиц: тяжёлого нейтрального бозона Хиггса  $H$  со спином 0 в двухдублетной хиггсовской модели (Two-Higgs-Doublet Model, 2HDM) [4], массивного векторного  $W'$ -бозона со спином 1 в модели тяжёлого векторного триплет (Heavy Vector Triplet, HVT) [5] и Калуца–Клейновские (КК) возбужденные состояния гравитона  $G_{KK}$  со спином 2 в расширенной модели Рэндалл–Сандрума (Randall-Sundrum, RS) [6]. Рождение данных резонансов может происходить не только через процессы слияния векторных бозонов (Vector Boson Fusion, VBF), но также возможно рождение  $G_{KK}$  и  $H$ -бозонов через процессы слияния глюонов (gluon-gluon fusion, ggF), а  $W'$ -бозонов — через процессы Дрелла-Яна (Drell-Yan, DY). Диаграммы Фейнмана, представляющие эти механизмы рождения, показаны на рисунке 1. В главе 6 для каждого из этих процессов в каждой выбранной теоретической модели проведен отдельный физический анализ данных.

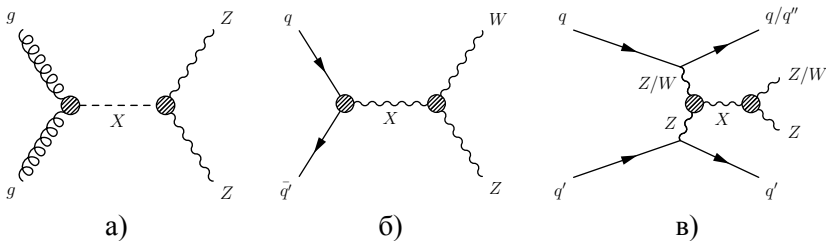


Рис. 1 — Диаграммы Фейнмана для рождения тяжёлого резонанса  $X$  через процессы слияния глюонов (а), через процессы Дрелла-Яна (б) и через процессы слияния векторных бозонов (в).

Помимо процесса VBF такое же конечное состояние  $VVjj$  в SM может быть у не менее интересного процесса — рассеяния векторных бозонов  $VV \rightarrow VV$  (Vector Boson Scattering, VBS). В SM процесс VBS определяется неабелевой природой группы симметрии электрослабой теории и включает в себя вершины взаимодействия векторных бозонов друг с другом, а также с бозоном Хиггса. Во многих моделях новой физики прогнозируется изменение сечения VBS [7]. В главе 7 приведены результаты первого измерения сечения данного процесса в полулептонных конечных состояниях.

Диаграммы Фейнмана, представляющие механизмы рождения  $VVjj$  в SM, представлены на рисунке 2. В отличие от фона, содержащего вершины сильного взаимодействия (QCD  $VVjj$ ), не представляется возможным строго отделить, сохраняя калибровочную инвариантность [20], фоновые процессы электрослабого рождения без рассеяния бозонов (EW non-VBS) от сигнального процесса VBS. Фоновые процессы non-VBS вносят значительный вклад в общее сечение рождения EW  $VVjj$ , поэтому они объединяются с процессом VBS при моделировании сигнала. Таким образом, в данном анализе проводится измерение сечения электрослабого рождения  $VVjj$  (VBS + non-VBS).

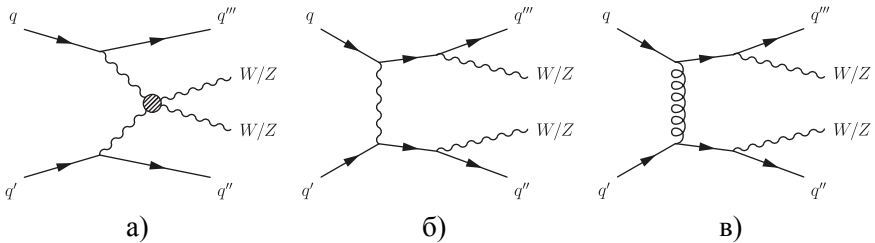


Рис. 2 — Диаграммы Фейнмана для рождения  $VVjj$  через процесс VBS (а), через остальные электрослабые процессы non-VBS (б) и через процессы QCD (в).

Во **второй главе** описана установка ATLAS на ускорителе LHC. Определена система координат эксперимента. Приведены основные характеристики ключевых подсистем детектора ATLAS: внутреннего детектора, системы калориметров и мюонного спектрометра. Изложена работа

системы триггера и сбора данных детектора ATLAS. Описана модель обработки больших массивов экспериментальных и смоделированных методом Монте-Карло данных.

Перед запуском второго сеанса работы LHC, Run-2, система триггера детектора ATLAS претерпела масштабное обновление и функционировала в данном сеансе в качестве двухуровневой системы, состоящей из следующих подсистем: триггера первого уровня (Level-1, L1), реализованного на аппаратном уровне, и триггера высокого уровня (High-Level Trigger, HLT), выполненного программным образом. Триггер первого уровня, предназначенный быстро идентифицировать объекты с большим поперечным импульсом, включает в себя центральный (L1 Central Trigger), калориметрический (L1Calo) и мюонный (L1Muon) триггеры.

**Третья глава** посвящена модернизации L1Muon триггера — разработке и введению в эксплуатацию дополнительного мюонного триггера адронного калориметра детектора ATLAS (L1 Tile-Muon). Дана мотивация проекта, описана новая электроника адронного калориметра. Подробно изложена архитектура микропрограммного обеспечения электронной платы триггера (Tile Muon Digitizer Board, TMDB). Представлен обзор двухуровневого ПО, разработанного для обеспечения управления и интеграции TMDB со всей триггерной системой детектора ATLAS.

Основным источником фона триггера L1Muon в передней области установки ATLAS являются протоны с низким импульсом, вылетающие из торцов тороидальных магнитов и системы защитного экранирования пучка [21]. Для того чтобы избавиться от ложных срабатываний L1Muon, реализована система совпадений с другой подсистемой установки ATLAS — сцинтилляционным адронным калориметром (Tile Calorimeter, TileCal). Информация из ячеек его внешнего слоя, которые расположены в области псевдобыстрот  $1.0 < |\eta| < 1.3$  и до которых долетают в основном только мюоны, поступает в L1Muon триггер и позволяет более эффективно отфильтровывать ложные мюонные события.

Во время одной из технических остановок LHC в 2015 году обновлено и интегрировано в систему сбора данных адронного калориметра 16 TMDB. На рисунке 3 показано распределение по псевдобыстроте кандидатов в мюоны с  $p_T > 20$  ГэВ, отобранных триггером L1Muon. Из анализа данных за периоды с включенным и выключенным L1 Tile-Muon

триггером следует, что в областях псевдобыстрот  $1.0 < |\eta| < 1.3$ , отмеченных красными прямоугольниками, количество срабатываний L1Muon триггера уменьшается примерно в 2 раза, что указывает на эффективное подавление фоновых событий в этих диапазонах псевдобыстрот.

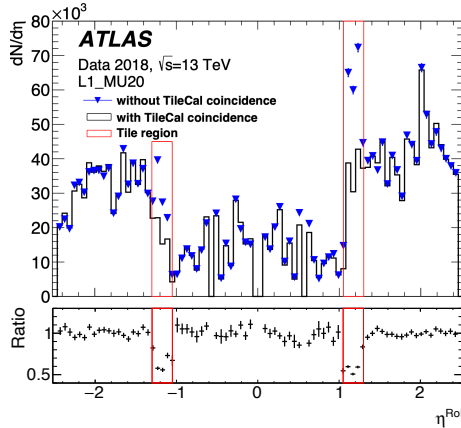


Рис. 3 — Распределение по псевдобыстроте кандидатов в мюоны с  $p_T > 20$  ГэВ, отобранных триггером L1Muon, с включенным (чёрная линия) и выключенным (синие точки) L1 Tile-Muon триггером на данных 2018 года. Красные прямоугольники показывают области покрытия внешнего слоя ячеек TileCal.

Триггер L1 Tile-Muon успешно введен в эксплуатацию в начале сеанса Run-2 и эффективно подавляет ложные мюонные события в передних кинематических областях детектора ATLAS без заметного снижения эффективности регистрации «полезных» событий (не более, чем на 2.5%). При этом общее количество срабатываний триггера L1Muon уменьшается приблизительно на 6%, что позволяет снизить нагрузку на систему сбора данных.

В четвёртой главе описаны стандартные в эксперименте ATLAS процедуры реконструкции, идентификации, изоляции электронов и мюонов. Представлен основной алгоритм реконструкции адронных струй — anti- $k_t$ . В данной работе из трёхмерных топологических кластеров энерговыделений в калориметрической системе реконструируются с помощью

алгоритма anti- $k_t$  два типа струй: тонкие струи, т. е. струи с параметром радиуса  $R = 0.4$  (small- $R$  jets,  $j$ ), и толстые струи — большого радиуса  $R = 1.0$  (large- $R$  jets,  $J$ ). Третий тип струй, т. н. трековые струи, реконструируются только по трекам из внутреннего детектора также алгоритмом anti- $k_t$ , но с параметром радиуса  $R = 0.2$ . В данной главе рассмотрены алгоритмы мечения бозонов и тримминга толстых струй, а также алгоритмы мечения вершины и  $b$ -мечения тонких и трековых струй.

Для обнаружения и идентификации электронов, мюонов и струй используют как трековые, так и калориметрические измерения, поэтому при одновременной реконструкции нескольких физических объектов один и тот же трек во внутреннем детекторе или кластер в калориметре может быть задействован несколько раз. Для устранения любой неоднозначности и определения приоритетов при реконструкции объектов вводится процедура удаления совпадений.

В данной главе приведены оптимальные критерии отбора объектов, обеспечивающие высокую эффективность реконструкции и идентификации электронов, мюонов и адронных струй. Эти критерии использовались при проведении нескольких физических анализов данных, описанных в главах 6 и 7.

**Пятая глава** посвящена современным методам обработки экспериментальных данных. В ней представлен краткий обзор генераторов событий методом Монте-Карло, выступающих в роли связующего звена между теорией и экспериментом. Данные генераторы широко используются в современной физике элементарных частиц для моделирования как известных процессов Стандартной модели, так и процессов, предсказанных теориями за пределами SM.

Изложена методика измерения сечений в фазовом объёме, доступном эксперименту. Для этого необходимо определить данный фазовый объём в каждом конкретном анализе данных. Затем задача измерения сечения сводится к задаче статистического анализа по нахождению значения неизвестного параметра силы или величины сигнала  $\mu$  из экспериментальных данных, которая в рамках частотного подхода решается методом максимизации функции правдоподобия.

В данной главе также приведено описание всех этапов статистического анализа: построение функции правдоподобия, проверка фоновой



гипотезы с помощью тестовой статистики, получение пределов на параметр  $\mu$  с помощью  $CL_s$ -метода [22; 23].

Основная задача физического анализа данных — эффективно выделить обогащенные сигналом области фазового пространства, т.н. сигнальные области (Signal Region, SR). Стандартная техника по выделению подобных областей заключается в определении критериев отбора событий по установлению пороговых значений на отдельные дискриминирующие переменные — наблюдаемые характеристики события, распределения по которым различаются для сигнала и фона. Эта техника наиболее эффективна, если дискриминирующие переменные не коррелируют между собой. При относительно небольших корреляциях используются техники многомерного анализа данных (Multivariate Analysis, MVA), основанные на методах машинного обучения. В данной диссертации для эффективного разделения сигнальных и фоновых процессов в анализе данных по поиску событий VBS (представленному в главе 7) используется классификатор, основанный на ансамбле деревьев решений (Boosted Decision Trees, BDT) [24]. В этой главе также дано краткое описание работы классификатора событий BDT.

В **шестой главе** представлены поиски тяжёлых дибозонных резонансов в полулептонном канале распада  $X \rightarrow ZV \rightarrow \ell\ell qq$  ( $\ell = e, \mu$ ) в диапазоне масс от 300 ГэВ до 5000 ГэВ на данных сеанса Run-2. В этом анализе используются два различных метода реконструкции распада  $V \rightarrow qq$ : разделение и объединение кварков. В режиме разделения (Resolved Reconstruction, RR) каждый кварк из пары  $qq$  реконструируется как тонкая струя (small- $R$  jet,  $j$ ). Но если масса резонанса  $X$  значительно превышает массы  $V$ -бозонов  $X \rightarrow VV$  распада, это приводит к большим поперечным импульсам  $V$ -бозонов, а угловое расстояние между парой кварков распада  $V \rightarrow qq$  уменьшается. В этом случае адроны, возникшие от пары кварков, перекрываются в детекторе и более эффективно реконструируются как одна толстая струя (large- $R$  jet,  $J$ ). Такая реконструкция распада  $V \rightarrow qq$  называется режимом объединения (Merged Reconstruction, MR). В свою очередь, алгоритм мечения бозонов, описанный в главе 4, позволяет разбить сигнальную MR область на две: «низкой чистоты» (Low Purity, LP) с более высокой эффективностью отбора толстых струй от распадов  $V$ -бозонов, но меньшей способностью к

подавлению фона, и «высокой чистоты» (High Purity, HP), где обеспечивается лучшее подавление фона.

Тяжёлые частицы проявляются в виде резонансных структур — пиков над фоном SM в распределениях по инвариантной массе конечного состояния  $\ell\ell qq$ . Таким образом инвариантные массы  $m_{\ell\ell J}$  и  $m_{\ell\ell jj}$  выступают в качестве основных дискриминирующих переменных, по которым проводится фитирование в MR и RR режимах соответственно.

В данной работе анализировались следующие сигнальные процессы:  $pp \xrightarrow{\text{ggF}} H \rightarrow ZZ$  (ggF  $H$ ) и  $pp \xrightarrow{\text{VBF}} H \rightarrow ZZ$  (VBF  $H$ ),  $pp \xrightarrow{\text{DY}} W' \rightarrow ZW$  (DY  $W'$ ) и  $pp \xrightarrow{\text{VBF}} W' \rightarrow ZW$  (VBF  $W'$ ),  $pp \xrightarrow{\text{ggF}} G_{\text{KK}} \rightarrow ZZ$  (ggF  $G_{\text{KK}}$ ). В качестве фона рассматривались процессы SM с конечным состоянием  $\ell\ell qq$ , которые невозможно до конца подавить соответствующим отбором событий. Доминирующим фоновым процессом в MR и RR режимах является ассоциированное рождение струй с  $Z$ -бозоном ( $Z + \text{струи}$ ,  $Z + \text{jets}$ ). Вторым по величине источником фона в MR режиме является нерезонансное рождение пары векторных бозонов  $ZZ$ ,  $WZ$  и  $WW$  — т.н. дибозоны Стандартной модели (SM Dibosons). В свою очередь в RR режиме процессы рождения топ кварка (одиночного  $t$ -кварка и пары  $t\bar{t}$ ) вносят сопоставимый с дибозонами SM вклад в фон. В данной главе описаны особенности MC моделирования фоновых и сигнальных процессов.

Критерии отбора событий и их категоризация по сигнальным и контрольным областям оптимизировались таким образом, чтобы максимально исключить фоновые события при минимальном воздействии на сигнал. Результат достигается таким выбором критериев отбора событий, при котором значимость  $Z$  принимает максимально возможное значение:

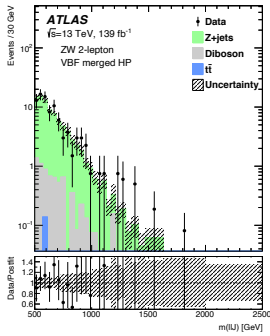
$$Z = \sqrt{2 \times \left( (s + b) \ln \left[ \frac{(s + b)(b + \sigma_b^2)}{b^2 + (s + b)\sigma_b^2} \right] - \frac{b^2}{\sigma_b^2} \ln \left[ 1 + \frac{\sigma_b^2 s}{b(b + \sigma_b^2)} \right] \right)},$$

где  $s$  и  $b$  — количество ожидаемых сигнальных и фоновых событий в данной области, при этом погрешность моделирования фоновых процессов  $\sigma_b$  предварительно оценивается в 10 %, т.е.  $\sigma_b = 0.1 \cdot b$ . В результате оптимизации критериев отбора для поиска  $H$ -бозона было выделено 7 сигнальных областей, для поисков  $W'$  и  $G_{\text{KK}}$  — 6 и 4 SR соответственно.

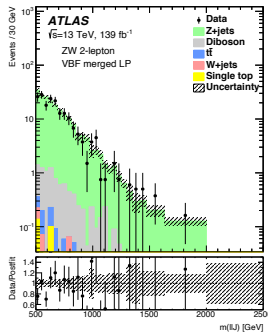
В данной главе перечислены источники экспериментальных систематических неопределенностей, а также оценены систематические погрешности МС моделирования фоновых и сигнальных процессов. Большинство экспериментальных погрешностей связано с различными описанными в главе 4 этапами реконструкции и калибровки физических объектов: при МС моделировании событий симуляция физических процессов и детектора происходит неидеально (приближенно), поэтому на основании калибровок производится коррекция смоделированных данных. Неопределенности подобных коррекций оцениваются по проводимым отдельно специальным измерениям. Оценка неопределенностей моделирования сигнальных процессов подробно описывается в приложении А. Все источники систематических погрешностей, включённые в анализ по поиску дибозонных резонансов, приведены в приложении Б. Также оценено влияние систематических погрешностей на поиск сигналов: неопределенности, связанные с толстыми струями и моделированием фоновых процессов, преобладают. По мере увеличения массы резонанса статистическая погрешность начинает доминировать над систематическими.

После выполнения статистических процедур, описанных в главе 5, обнаружено хорошее согласие между экспериментальными данными и фоновыми предсказаниями SM. Для этого экспериментальные данные фитировались одновременно по всем сигнальным и контрольным областям методом максимизации функции правдоподобия в рамках фоновой гипотезы ( $\mu = 0$ ). Проверка достоверности результатов фитирования подробно изложена в приложении В. Распределения событий по основным дискриминирующим переменным во всех сигнальных областях поиска  $W' \rightarrow ZW$  представлены на рисунке 4.

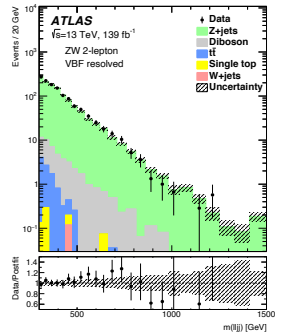
Верхние пределы на сечения рождения массивных резонансов в дибозонном канале распада  $\sigma(pp \rightarrow X \rightarrow VV)$  устанавливались с использованием метода  $CL_s$  [23; 25]. Данные результаты объединены с результатами поиска резонансов по всем другим полулептонным каналам распада дибозонов. На рисунке 5 показаны наблюдаемые и ожидаемые (соответствующие тому, что превышения над фоновой гипотезой не наблюдается) верхние пределы на  $\sigma(pp \rightarrow X \rightarrow VV)$  для модели HVT и



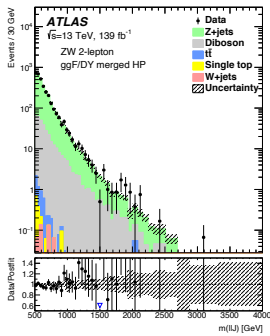
а) VBF HP MR SR



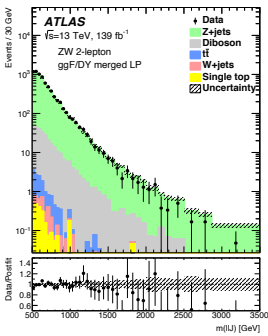
б) VBF LP MR SR



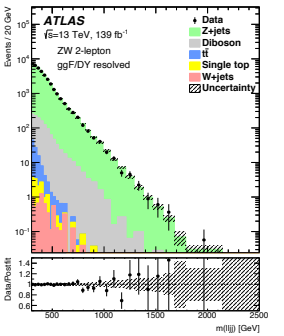
в) VBF RR SR



г) DY HP MR SR



д) DY LP MR SR



е) DY RR SR

Рис. 4 — Наблюдаемые и ожидаемые распределения событий по инвариантной массе конечного состояния  $\ell\ell qq$  поиска  $W' \rightarrow ZW$  во всех сигнальных областях. Цветными гистограммами представлены вклады основных фоновых процессов, уточнённые по результатам совместного фитирования наблюдаемых данных по всем сигнальным и контрольным областям в рамках фоновой гипотезы ( $\mu = 0$ ). В нижней части графиков приведено отношение количества наблюдаемых событий к сумме событий всех фоновых предсказаний SM. Для наблюдаемых данных (чёрные точки) представлены статистические погрешности.

Заштрихованные области представляют совокупность всех погрешностей, связанных с описанием фона SM.

RS, установленные с уровнем достоверности 95 %. Нижним наблюдаемым пределом по массе на существование резонанса является точка пересечения кривой верхних наблюдаемых пределов на сечения с кривой теоретических сечений. Как следует из рисунка, кривые пересекаются в районе 4 ТэВ для HVT модели и 2 ТэВ для RS модели (т.е. существование  $W'$ -бозона с массами ниже 4 ТэВ и гравитона  $G_{KK}$  с массами ниже 2 ТэВ исключено).

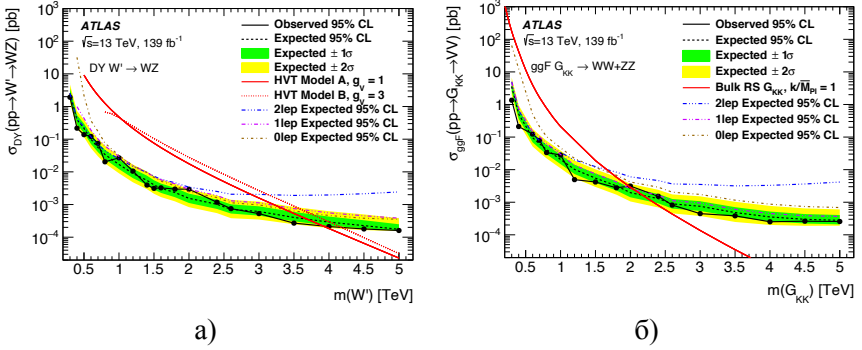


Рис. 5 — Верхние наблюдаемые (чёрная кривая) и ожидаемые (чёрная пунктирная кривая) пределы на  $\sigma(pp \xrightarrow{DY} W' \rightarrow ZW)$  (а) и  $\sigma(pp \xrightarrow{ggF} G_{KK} \rightarrow VV)$  (б), установленные с уровнем достоверности 95 % для объединения  $llqq$ ,  $\nu\nu qq$  и  $l\nu qq$  каналов распада дибозонов. Красными кривыми представлены теоретические сечения рождения тяжёлых  $G_{KK}$  и  $W'$ -бозонов. Для ожидаемых пределов показаны зелёная и жёлтая полосы неопределённости в одно и два стандартных отклонения соответственно.

Представленные оценки пределов на сечения и массы резонансов значительно превосходят предыдущие, полученные на данных сеанса Run-1 в экспериментах ATLAS и CMS [16–18], и являются наилучшими из существующих на данный момент.

В седьмой главе представлены результаты первого измерения сечения электрослабого рождения  $ZVjj$  с последующим полулептонным распадом  $ZV \rightarrow llqq$  на данных 2015–2016 годов сеанса Run-2. В качестве основы для изучения процесса VBS выступает анализ, изложенный

в главе 6, по поиску дибозонных резонансов, рождённых через процесс VBF, с точно таким же конечным состоянием  $ZVjj$ . Используются уже подготовленные фоновые наборы данных MC, выполняется моделирование только сигнального процесса — процесса электрослабого рождения  $ZVjj$ . Отбор событий незначительно переоптимизируется под новый сигнал для достижения максимальной значимости.

С целью повышения эффективности разделения сигнала VBS и фоновых процессов в качестве основной дискриминирующей переменной, по которой проводится фитирование в сигнальных областях, используется выход классификатора BDT, описанный в главе 5. Это позволяет эффективно учитывать всю кинематическую информацию о событиях за счёт использования корреляций между входными дискриминирующими переменными BDT. В этой главе представлены оптимальные наборы входных дискриминирующих переменных и процесс обучения классификатора BDT. Подобный выбор техники многомерного анализа данных позволяет добиться увеличения ожидаемой статистической значимости сигнала приблизительно на 70 % по сравнению с использованием основной дискриминирующей переменной  $m_{\ell\ell qq}$  из главы 6. Распределения входных переменных приведены в приложении Г, а выхода классификатора BDT — на рисунке 6.

В данной главе также рассмотрены и оценены специфические для данного анализа источники систематических погрешностей: моделирование сигнального процесса EW  $ZVjj$  и эффект интерференции между процессами EW  $ZVjj$  и QCD  $ZVjj$ .

Все статистические процедуры выполнены по аналогии с поиском дибозонных резонансов, рождённых через процесс VBF. Экспериментальные данные фитируются одновременно по всем сигнальным и контрольным областям методом максимизации функции правдоподобия в рамках сигнальной гипотезы ( $\mu > 0$ ). По результатам фитирования определяется сила сигнала:

$$\mu_{EW\ ZVjj}^{\text{obs}} = 1.97_{-0.77}^{+0.83} = 1.97 \pm 0.50(\text{стат.})_{-0.59}^{+0.65}(\text{сист.}).$$

Наблюдается согласие между экспериментальными данными и предсказанием SM, в котором предполагается  $\mu = 1$ . Следовательно, статистически значимых указаний на существование новой физики не обнаружено.

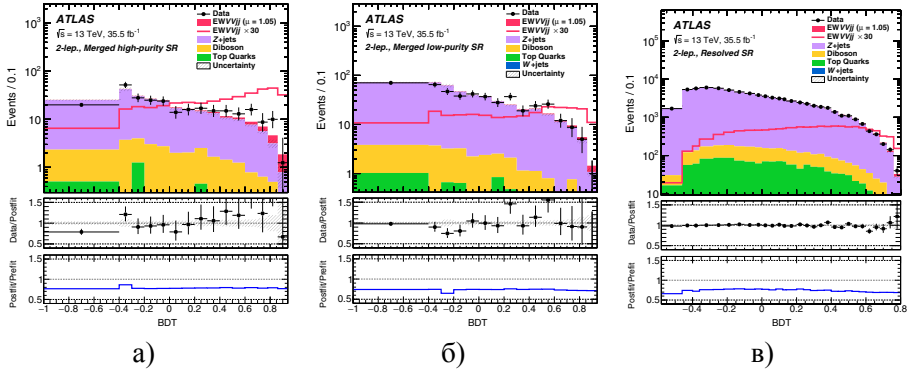


Рис. 6 — Наблюдаемые и ожидаемые распределения событий по основной дискриминирующей переменной  $BDT$  в областях HP MR SR (а), LP MR SR (б) и RR SR (в). Цветными гистограммами представлены вклады фоновых и сигнальных  $EW VVjj$  процессов, которые были уточнены из результатов совместного фитирования наблюдаемых данных по всем сигнальным и контрольным областям. Красной линией показано ожидаемое распределение сигнальных событий электрослабого рождения  $VVjj$  с коэффициентом масштабирования равным 30. В средней части графиков приведено отношение числа событий наблюдаемых данных к сумме событий сигнальных и фоновых предсказаний SM. В нижней части графиков показаны отношения вкладов фоновых процессов SM до и после их уточнения по результатам фитирования. Для наблюдаемых данных (чёрные точки) представлены статистические погрешности. Заштрихованные области представляют совокупность всех погрешностей, связанных с описанием сигнальных и фоновых процессов.

После определения доступного эксперименту фазового объёма измеряется сечение электрослабого рождения  $ZVjj$ . В таблице 1 представлены измеренные и предсказанные в SM сечения электрослабого рождения  $ZVjj$ . Из таблицы следует, что измеренные сечения согласуются с предсказаниями Стандартной модели.

Таблица 1 — Предсказанные и измеренные сечения электрослабого рождения  $ZVjj$ .

Фазовый объём	Предсказанное сечение	Измеренное сечение
	$\sigma_{EW}^{\text{fid, SM}} ZVjj$ [фб]	$\sigma_{EW}^{\text{fid, obs}} ZVjj$ [фб]
$ZV \rightarrow \ell\ell J$ (MR)	$1.2 \pm 0.1(\text{теор.})$	$2.4 \pm 0.6(\text{стат.})_{-0.7}^{+0.8}(\text{сист.})$
$ZV \rightarrow \ell\ell jj$ (RR)	$6.0 \pm 0.4(\text{теор.})$	$11.8 \pm 3.0(\text{стат.})_{-3.5}^{+3.8}(\text{сист.})$
Полный	$7.2 \pm 0.4(\text{теор.})$	$14.2 \pm 3.6(\text{стат.})_{-4.2}^{+4.6}(\text{сист.})$

После объединения полученных результатов с данными каналов распада дибозонов, содержащих нейтрино  $\nu$  ( $WV \rightarrow \ell\nu qq$  и  $ZV \rightarrow \nu\nu qq$ ), впервые осуществлено измерение сечения электрослабого рождения  $VVjj$  по всем полулептонным конечным состояниям:

$$\sigma_{EW}^{\text{fid, obs}} VVjj = 45.1 \pm 8.6(\text{стат.})_{-14.6}^{+15.9}(\text{сист.}) \text{ фб},$$

что также хорошо согласуется с предсказаниями Стандартной модели:

$$\sigma_{EW}^{\text{fid, SM}} VVjj = 43.0 \pm 2.4(\text{теор.}) \text{ фб}.$$

По результатам объединения фоновая гипотеза ( $\mu = 0$ ) исключается с наблюдаемой статистической значимостью  $2.7\sigma$  при ожидаемой значимости в  $2.5\sigma$ .

В **заключении** представлены основные результаты:

1. Разработано программное обеспечение в системе триггера и сбора данных установки ATLAS, которое обеспечивает управление и интеграцию новой электронной платы (TMDB) со всей триггерной системой детектора ATLAS.



2. Создан онлайн декодирующий данных и триггерных решений, вырабатываемых TMDb, для обеспечения мониторинга стабильности функционирования и быстрой настройки L1 Tile-Muon триггера.
3. Используя разработанное триггерное ПО, протестирована, настроена и введена в эксплуатацию новая электроника L1 Tile-Muon триггера, установленная во время модернизации адронного калориметра перед сеансом Run-2.
4. Создано программное обеспечение для анализа данных установки ATLAS, с помощью которого выделены события распада  $ZV \rightarrow llqq$ . Оптимизированы критерии отбора объектов, обеспечивающие высокую эффективность реконструкции и идентификации электронов, мюонов и адронных струй.
5. Используя данное ПО для поиска массивных дибозонных резонансов и поиска событий процесса VBS в канале распада  $ZV \rightarrow llqq$ , сформулированы и оптимизированы критерии отбора событий, выбраны методики категоризации событий по сигнальным и контрольным областям.
6. Произведена оценка вклада фоновых процессов, предсказываемых SM. Для этого смоделированные методом Монте-Карло фоновые события проходили отбор с помощью разработанного ПО.
7. С целью увеличения эффективности разделения сигнала VBS и фоновых процессов разработан и оптимизирован классификатор событий, основанный на одном из методов машинного обучения — ансамбле деревьев решений (BDT).
8. Оценена эффективность работы классификатора BDT. В результате его применения ожидаемая статистическая значимость предсказанного сигнала повышается с  $1.5\sigma$  до  $2.5\sigma$ .
9. Выполнена оценка систематических погрешностей MC моделирования фоновых и сигнальных процессов.
10. Проведено сравнение распределений событий по кинематическим переменным между экспериментальными данными и смоделированными методом MC фоновыми процессами.

11. Для модели тяжёлого векторного триплета, двухдублетной хиггсовской модели и расширенной модели Рэндалл–Сандрума установлены верхние пределы на сечения рождения массивных резонансов в дибозонном канале распада  $\sigma(pp \rightarrow X \rightarrow ZV)$  с полулептонным конечным состоянием, а также установлены нижние пределы по массе на существование таких резонансов на уровне достоверности 95 %.
12. Впервые осуществлено измерение сечения электрослабого рождения  $VVjj$  по всем полулептонным конечным состояниям  $VV$ , включая канал распада  $ZV \rightarrow \ell\ell qq$ . Статистическая значимость наблюдаемого сигнала составила 2.7 стандартных отклонений.

## Основные публикации по теме диссертации

1. Searches for heavy diboson resonances in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector / M. Aaboud, ..., A. Ryzhov, [et al.] // JHEP. — 2016. — Vol. 09. — P. 173. — DOI: [10.1007/JHEP09\(2016\)173](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2016)173). — arXiv: [1606.04833](https://arxiv.org/abs/1606.04833) [hep-ex].
2. Searches for heavy  $ZZ$  and  $ZW$  resonances in the  $\ell\ell qq$  and  $\nu\nu qq$  final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector / M. Aaboud, ..., A. Ryzhov, [et al.] // JHEP. — 2018. — Vol. 03. — P. 009. — DOI: [10.1007/JHEP03\(2018\)009](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2018)009). — arXiv: [1708.09638](https://arxiv.org/abs/1708.09638) [hep-ex].
3. Search for heavy diboson resonances in semileptonic final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector / G. Aad, ..., A. Ryzhov, [et al.] // Eur. Phys. J. C. — 2020. — Vol. 80, no. 12. — P. 1165. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-020-08554-y](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08554-y). — arXiv: [2004.14636](https://arxiv.org/abs/2004.14636) [hep-ex].
4. Ryzhov, A. ATLAS searches for resonances decaying to boson pairs / A. Ryzhov // EPJ Web Conf. — 2017. — Vol. 158. — P. 02003. — DOI: [10.1051/epjconf/201715802003](https://doi.org/10.1051/epjconf/201715802003).

5. *Ryzhov, A.* The Level-1 Tile-Muon Trigger in the Tile Calorimeter upgrade program / A. Ryzhov // JINST. — 2016. — Vol. 11, no. 12. — P. C12049. — DOI: [10.1088/1748-0221/11/12/C12049](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/C12049).
6. Search for electroweak diboson production in association with a high-mass dijet system in semileptonic final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector / G. Aad, ..., A. Ryzhov, [et al.] // Phys. Rev. D. — 2019. — Vol. 100, no. 3. — P. 032007. — DOI: [10.1103/PhysRevD.100.032007](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.032007). — arXiv: [1905.07714](https://arxiv.org/abs/1905.07714) [hep-ex].
7. *ATLAS Collaboration.* Search for diboson resonances in the  $\ell q q$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector / ATLAS Collaboration. — ATLAS-CONF-2015-071. — Geneva, 2015. — URL: <http://cds.cern.ch/record/2114843>.
8. *ATLAS Collaboration.* Search for  $ZZ$  resonances in the  $\ell q q$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector / ATLAS Collaboration. — ATLAS-CONF-2016-016. — Geneva, 2016. — URL: <http://cds.cern.ch/record/2141005>.
9. *ATLAS Collaboration.* Searches for heavy  $ZZ$  and  $ZW$  resonances in the  $\ell q q$  and  $\nu \nu q q$  final states in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector / ATLAS Collaboration. — ATLAS-CONF-2016-082. — Geneva, 2016. — URL: <http://cds.cern.ch/record/2206275>.

## Список литературы

1. *Di Lella, L.* The Discovery of the  $W$  and  $Z$  Particles / L. Di Lella, C. Rubbia // Adv. Ser. Dir. High Energy Phys. — 2015. — T. 23. — C. 137—163. — DOI: [10.1142/9789814644150\\_0006](https://doi.org/10.1142/9789814644150_0006). — URL: <http://cds.cern.ch/record/2103277>.
2. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC / G. Aad [et al.] // Physics Letters B. — 2012. — Vol. 716, no. 1. — P. 1—29. — DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.020](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020). — arXiv: [1207.7214](https://arxiv.org/abs/1207.7214) [hep-ex].

3. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC / S. Chatrchyan [et al.] // *Physics Letters B*. — 2012. — Vol. 716, no. 1. — P. 30—61. — DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021). — arXiv: [1207.7235](https://arxiv.org/abs/1207.7235) [hep-ex].
4. Theory and phenomenology of two-Higgs-doublet models / G. Branco [et al.] // *Physics Reports*. — 2012. — Vol. 516, no. 1/2. — P. 1—102. — DOI: [10.1016/j.physrep.2012.02.002](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.02.002). — arXiv: [1106.0034](https://arxiv.org/abs/1106.0034) [hep-ph].
5. Heavy vector triplets: bridging theory and data / D. Pappadopulo [et al.] // *Journal of High Energy Physics*. — 2014. — Vol. 2014, no. 9. — DOI: [10.1007/jhep09\(2014\)060](https://doi.org/10.1007/jhep09(2014)060). — arXiv: [1402.4431](https://arxiv.org/abs/1402.4431) [hep-ph].
6. Searching for the Kaluza-Klein graviton in bulk RS models / L. Fitzpatrick [et al.] // *Journal of High Energy Physics*. — 2007. — Vol. 2007, no. 09. — P. 013—013. — DOI: [10.1088/1126-6708/2007/09/013](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2007/09/013). — arXiv: [hep-ph/0701150](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0701150) [hep-ph].
7. *Éboli*, O. J. P. Bosonic quartic couplings at CERN LHC / O. J. P. Éboli, M. C. Gonzalez-Garcia, S. M. Lietti // *Physical Review D*. — 2004. — Vol. 69, no. 9. — DOI: [10.1103/physrevd.69.095005](https://doi.org/10.1103/physrevd.69.095005). — arXiv: [hep-ph/0310141](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0310141) [hep-ph].
8. Effective field theory: A modern approach to anomalous couplings / C. Degrande [et al.] // *Annals of Physics*. — 2013. — Vol. 335. — P. 21—32. — DOI: [10.1016/j.aop.2013.04.016](https://doi.org/10.1016/j.aop.2013.04.016). — arXiv: [1205.4231](https://arxiv.org/abs/1205.4231) [hep-ph].
9. Search for resonant diboson production in the  $\ell\ell q\bar{q}$  final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector / G. Aad [et al.] // *The European Physical Journal C*. — 2015. — Vol. 75, no. 2. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3261-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3261-8). — arXiv: [1409.6190](https://arxiv.org/abs/1409.6190) [hep-ex].
10. Search for massive resonances decaying into pairs of boosted bosons in semi-leptonic final states at  $\sqrt{s} = 8$  TeV / V. Khachatryan [et al.] // *Journal of High Energy Physics*. — 2014. — Vol. 2014, no. 8. — DOI: [10.1007/jhep08\(2014\)174](https://doi.org/10.1007/jhep08(2014)174). — arXiv: [1405.3447](https://arxiv.org/abs/1405.3447) [hep-ex].

11. Evidence for Electroweak Production of  $W^\pm W^\pm jj$  in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS Detector / G. Aad [et al.] // Physical Review Letters. — 2014. — Vol. 113, no. 14. — DOI: [10.1103/physrevlett.113.141803](https://doi.org/10.1103/physrevlett.113.141803). — arXiv: [1405.6241](https://arxiv.org/abs/1405.6241) [hep-ex].
12. Study of Vector Boson Scattering and Search for New Physics in Events with Two Same-Sign Leptons and Two Jets / V. Khachatryan [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — Vol. 114, no. 5. — DOI: [10.1103/physrevlett.114.051801](https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.051801). — arXiv: [1410.6315](https://arxiv.org/abs/1410.6315) [hep-ex].
13. Observation of Electroweak Production of Same-Sign  $W$  Boson Pairs in the Two Jet and Two Same-Sign Lepton Final State in Proton-Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV / A. M. Sirunyan [et al.] // Physical Review Letters. — 2018. — Vol. 120, no. 8. — DOI: [10.1103/physrevlett.120.081801](https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.081801). — arXiv: [1709.05822](https://arxiv.org/abs/1709.05822) [hep-ex].
14. Observation of electroweak  $W^\pm Z$  boson pair production in association with two jets in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector / M. Aaboud [et al.] // Physics Letters B. — 2019. — Vol. 793. — P. 469–492. — DOI: [10.1016/j.physletb.2019.05.012](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.05.012). — arXiv: [1812.09740](https://arxiv.org/abs/1812.09740) [hep-ex].
15. Search for anomalous electroweak production of  $WW/WZ$  in association with a high-mass dijet system in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector / M. Aaboud [et al.] // Physical Review D. — 2017. — Vol. 95, no. 3. — DOI: [10.1103/physrevd.95.032001](https://doi.org/10.1103/physrevd.95.032001). — arXiv: [1609.05122](https://arxiv.org/abs/1609.05122) [hep-ex].
16. Search for an additional, heavy Higgs boson in the  $H \rightarrow ZZ$  decay channel at  $\sqrt{s} = 8$  TeV in  $pp$  collision data with the ATLAS detector / G. Aad [et al.] // The European Physical Journal C. — 2016. — Vol. 76, no. 1. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3820-z](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3820-z). — arXiv: [1507.05930](https://arxiv.org/abs/1507.05930) [hep-ex].
17. Combination of searches for  $WW$ ,  $WZ$ , and  $ZZ$  resonances in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector / G. Aad [et al.] // Physics Letters B. — 2016. — Vol. 755. — P. 285–305. — DOI: [10.1016/j.physletb.2016.02.015](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.02.015). — arXiv: [1512.05099](https://arxiv.org/abs/1512.05099) [hep-ex].

18. Combination of searches for heavy resonances decaying to  $WW$ ,  $WZ$ ,  $ZZ$ ,  $WH$ , and  $ZH$  boson pairs in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  and 13 TeV / A. Sirunyan [et al.] // *Physics Letters B*. — 2017. — Vol. 774. — P. 533–558. — DOI: [10.1016/j.physletb.2017.09.083](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.09.083). — arXiv: [1705.09171](https://arxiv.org/abs/1705.09171) [[hep-ex](#)].
19. Combination of searches for heavy resonances decaying into bosonic and leptonic final states using 36 fb<sup>-1</sup> of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector / M. Aaboud [et al.] // *Physical Review D*. — 2018. — Vol. 98, no. 5. — DOI: [10.1103/physrevd.98.052008](https://doi.org/10.1103/physrevd.98.052008). — arXiv: [1808.02380](https://arxiv.org/abs/1808.02380) [[hep-ex](#)].
20. Strong  $W^+W^+$  scattering signals at  $pp$  supercolliders / V. D. Barger [et al.] // *Phys. Rev. D*. — 1990. — Vol. 42. — P. 3052–3077. — DOI: [10.1103/PhysRevD.42.3052](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.42.3052).
21. New Small Wheel Technical Design Report / T. Kawamoto [et al.]. — CERN-LHCC-2013-006. — Geneva, 2013. — URL: <http://cds.cern.ch/record/1552862>.
22. *Read, A. L.* Modified frequentist analysis of search results (the  $CL_s$  method) / A. L. Read. — CERN-OPEN-2000-205. — 2000. — URL: <http://cds.cern.ch/record/451614>.
23. *Read, A. L.* Presentation of search results: the  $CL_s$  technique / A. L. Read // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2002. — Vol. 28, no. 10. — P. 2693–2704. — DOI: [10.1088/0954-3899/28/10/313](https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/10/313).
24. TMVA 4 - Toolkit for Multivariate Data Analysis with ROOT: Users Guide / A. Hocker [et al.]. — CERN-OPEN-2007-007. — Geneva, 2007. — URL: <https://cds.cern.ch/record/1019880>.
25. Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics / G. Cowan [et al.] // *The European Physical Journal C*. — 2011. — Vol. 71, no. 2. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-011-1554-0](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1554-0). — arXiv: [1007.1727](https://arxiv.org/abs/1007.1727) [[physics.data-an](#)].

*Рукопись поступила 9 августа 2021 года.*

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

А. В. Рыжов

Исследование парного рождения векторных бозонов с последующим распадом на заряженные лептоны и адроны в эксперименте ATLAS.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\LaTeX$ .

---

Подписано к печати 10.08.2021. Формат  $60 \times 84/16$ . Цифровая печать.  
Печ.л. 1,5. Уч.-изд.л. 1,4. Тираж 100. Заказ 21. Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

[www.ihep.ru](http://www.ihep.ru); библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ, 2021

---