

На правах рукописи

Черемушкина Евгения Вадимовна

**Поиск возбужденных электронов и дибозонных
резонансов в конечном состоянии с лептоном,
нейтрино и струями на детекторе ATLAS на LHC**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2020

УДК 539.126.4

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

Научный руководитель — к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ, А.Г. Мягков.

Официальные оппоненты: д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник НИИ Ядерной Физики имени Д.В. Скобелыцына МГУ (г. Москва), А.М. Снигирев; к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Института Ядерных Исследований РАН (г. Троицк), М.М. Кирсанов.

Ведущая организация — Международная межправительственная организация ОИЯИ (г. Дубна).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2020 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.ru/pages/main/6582/6745/index.shtml>
НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Современное описание физики частиц опирается на Стандартную модель (SM) элементарных частиц и их сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Стандартная модель, с одной стороны, не является полной, так как не включает гравитационное взаимодействие и не предсказывает существование темной материи и энергии, а с другой — не предсказывает ряд экспериментальных фактов, таких как наличие трех поколений фермионов, осцилляции нейтрино, иерархия между электрослабым и планковским масштабами, асимметрия распространенности частиц и античастиц во вселенной. Поэтому, одним из самых актуальных направлений исследований в физике высоких энергий является поиск проявлений «новой физики» — расширений Стандартной модели.

Одним из таких возможных проявлений является одиночное рождение возбужденных электронов, предсказываемых различными моделями составленности, которые вводятся, в частности, для объяснения существования наблюдаемых фермионов в SM, их группировки в поколения и распределения по массам. Поиски возбужденных лептонов в различных конечных состояниях проводились ранее в экспериментах на ускорителях LEP, HERA, Tevatron. Их результаты позволили наложить ограничения при доступных энергиях и светимостях на параметры модели составленности: массу возбужденного лептона и масштаб составленности. Поиск возбужденных электронов в данной работе проведен при ранее недоступной энергии в системе центра масс, что позволило наложить более строгие ограничения на параметры модели составленности.

Кроме того, в данной работе проведен поиск дибозонных резонансов в рамках расширенной модели Рэндалл–Сандрума, позволяющей объяснить слабость гравитационного взаимодействия, и расши-

ренной калибровочной модели, имеющей феноменологические свойства многих расширений калибровочного сектора SM. Поиски дибозонных резонансов осуществлялись ранее и продолжаются в настоящее время в экспериментах ATLAS и CMS на LHC.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель настоящей диссертационной работы заключается в проверке моделей возбужденных электронов и дибозонных резонансов и получении ограничений на их параметры в полулептонном конечном состоянии, включающем лептон, нейтрино и адронные струи, на данных, собранных детектором ATLAS на LHC в протон–протонных (pp) столкновениях с энергией пучков в системе центра масс (\sqrt{s}), равной 13 ТэВ в 2015–2016 годах и 8 ТэВ в 2012 году, соответственно. Для реализации поставленной цели автором были решены следующие задачи:

- Выбор и обоснование полулептонного конечного состояния для поиска возбужденных электронов.
- Моделирование сигнальных наборов данных для поиска возбужденных электронов в событиях с электроном, нейтрино и W -бозоном.
- Оптимизация условий отбора объектов и первичного отбора событий для поиска возбужденных электронов в конечном состоянии с электроном, нейтрино и адронно распадающимся W -бозоном в pp столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в детекторе ATLAS.
- Оценка вклада фоновых процессов в поиске возбужденных электронов.
- Выбор дискриминирующих переменных, а также построение сигнальных, контрольных и проверочных областей для поиска возбужденных электронов в pp взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
- Оценка систематических неопределенностей в поиске возбужденных электронов.

- Проведение статистического анализа и получение ограничений на параметры модели возбужденных электронов в поиске в полулептонном конечном состоянии.
- Оптимизация условий отбора объектов и первичного отбора событий для поиска дибозонных резонансов в полулептонном конечном состоянии на данных, полученных на детекторе ATLAS в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ.

Научная новизна

Поиск возбужденных электронов в конечном состоянии с электроном, нейтрино и струями проведен на данных, полученных в протон–протонных столкновениях в детекторе ATLAS на LHC с беспрецедентно высокой энергией пучков в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и набранной интегральной светимостью $\mathcal{L}_{\text{int}} = 36.1$ фб⁻¹. Кроме того, поиск возбужденных электронов в данном конечном состоянии выполнен впервые в эксперименте на LHC. Полученные результаты были скомбинированы с результатами поиска возбужденных электронов в конечном состоянии с двумя электронами и струями, что позволило установить наиболее жесткие ограничения на параметры модели возбужденных электронов в сравнении с результатами предыдущих анализов на момент написания данной диссертационной работы.

Поиск дибозонных резонансов в конечном состоянии с электроном, нейтрино и струями проведен на данных, полученных в протон–протонных столкновениях в детекторе ATLAS на LHC с беспрецедентно высокой, на момент его проведения, энергией $\sqrt{s} = 8$ ТэВ и интегральной светимостью $\mathcal{L}_{\text{int}} = 20.3$ фб⁻¹. Для гравитона Каллуца–Клейна в модели Рэндалл–Сандрума были получены наиболее жесткие ограничения снизу на массу в сравнении с анализами, проведенными на данных с $\sqrt{s} = 8$ ТэВ в экспериментах ATLAS и CMS в других конечных состояниях.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты поисков возбужденных электронов и дибозонных резонансов, включенные в данную диссертацию, являются практической проверкой теоретических и феноменологических моделей рас-

ширения SM, таких как модель составленности [4], расширенная модель Рэндалл–Сандрума [5] и расширенная калибровочная модель [6], и могут служить указаниями при дальнейшей теоретической разработке моделей этих классов. Результаты данной работы могут быть использованы для получения ограничений на параметры различных моделей новой физики вне Стандартной модели с использованием более полного набора данных, полученных в экспериментах на LHC. Методика поиска дибозонных резонансов при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ легла в основу последующих работ коллаборации ATLAS по поиску дибозонных резонансов в протон–протонных столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.

Положения, выносимые на защиту

1. Выбор и обоснование полулептонного конечного состояния для поиска возбужденных электронов.
2. Методика моделирования сигнальных наборов данных для поиска возбужденных электронов в событиях с электроном, нейтрино и W -бозоном.
3. Оптимизация условий отбора объектов и первичного отбора событий для поиска возбужденных электронов в конечном состоянии с электроном, нейтрино и адронно распадающимся W -бозоном в pp столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в детекторе ATLAS.
4. Оценка вклада фоновых процессов в поиске возбужденных электронов.
5. Выбор дискриминирующих переменных, а также построение сигнальных, контрольных и проверочных областей для поиска возбужденных электронов в pp взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
6. Оценка систематических неопределенностей в поиске возбужденных электронов.

7. Проведение статистического анализа и получение ограничений на параметры модели возбужденных электронов в поиске в полуплептонном конечном состоянии.
8. Оптимизация условий отбора объектов и первичного отбора событий для поиска дибозонных резонансов в полуплептонном конечном состоянии на данных, полученных на детекторе ATLAS в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы доложены лично автором на следующих конференциях по физике высоких энергий:

- “The 3rd Annual Large Hadron Collider Physics Conference, St. Petersburg, Russia, 31 August – 5 September 2015 (LHCP2015)” в виде постерного доклада [7];
- “Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, ОИЯИ Дубна, Россия, 12–15 апреля 2016 (РАН2016)” в виде доклада на параллельной сессии [1];

а также на внутренних собраниях коллаборации ATLAS и семинарах НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ.

Кроме того, результаты диссертации были представлены соавторами коллаборации ATLAS на конференциях по физике высоких энергий:

- “European Physical Society Conference on High Energy Physics 2019, Ghent, Belgium, 10–17 July 2019 (EPS-HEP2019)” в виде доклада на параллельной сессии [8].

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в четырех научных работах, из них три опубликованы в рецензируемых научных журналах:

- ATLAS Collaboration, “Search for excited electrons singly produced in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment at the LHC” [2];

- ATLAS Collaboration, “Search for production of WW/WZ resonances decaying to a lepton, neutrino and jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector” [3];
- Cheremushkina E., “Semileptonic (lepton, neutrino and jets) WW/WZ resonances searches at $\sqrt{s} = 8$ and 13 TeV with the ATLAS detector at the LHC” [1], по материалам доклада на конференции РАН2016, проведенной в ОИЯИ Дубна, Россия, в апреле 2016 года;

материалы доклада на конференции LHCP2015 опубликованы в виде препринта CERN:

- Cheremushkina E., “Semileptonic (lepton, neutrino and jets) WW/WZ resonances search at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector at the LHC” [9].

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Вклад автора в поиск возбужденных электронов в конечном состоянии с электроном, нейтрино и W -бозоном, распадающимся в адронном канале, $(e\nu J)$ на данных, полученных в протон–протонных столкновениях с энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, является определяющим, как и соответствующие вклады в публикацию [2] в реферируемом журнале и внутреннюю документацию коллаборации ATLAS. Кроме того, автором внесен определяющий вклад в работу по поиску дибозонных резонансов в конечном состоянии с лептоном (электроном или мюоном), нейтрино и струями в эксперименте ATLAS при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, а именно, оптимизация условий отбора объектов и первичного отбора событий. Таким образом, личный вклад диссертанта является критически важным для всего направления поиска возбужденных электронов и дибозонных резонансов в эксперименте ATLAS.

Структура и объем диссертации

Обязательная часть диссертации состоит из введения, восьми глав, заключения и библиографии. Кроме того, текст диссертации

включает в себя список сокращений и условных обозначений и 11 приложений. Общий объем диссертации равен 208 страницам, включая 311 рисунков и 63 таблицы. Библиография состоит из 133 наименований на 18 страницах.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна работы, описана теоретическая и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту. Приведены данные о степени достоверности и апробации результатов, публикации, а также обозначен личный вклад автора в опубликованные работы. В завершении введения дана информация о структуре и объеме диссертации.

В первой главе описаны модели сигнала рождения возбужденных электронов (EL) и дибозонных резонансов (VV). Перечислены опубликованные на данный момент работы по поиску EL и VV в ATLAS и других экспериментах.

Возбужденные лептоны (ℓ^*) и кварки (q^*) возникают в различных моделях составленности [4; 10–14], введенных для объяснения существования трех поколений лептонов и кварков в Стандартной модели (SM) и их иерархии с большим различием масс. В моделях составленности предложены новые гипотетические частицы, преоны, которые на масштабе составленности Λ формируют фермионы Стандартной модели и их возбужденные состояния. Используемая в данной работе феноменологическая модель составленности кварков и лептонов, впервые опубликованная в 1990 году [4], содержит два свободных параметра, ограничивающихся в данной работе: масштаб составленности Λ и массу возбужденного электрона $m_{e^*} \lesssim \Lambda$.

В данной работе изложены методика и результаты поиска возбужденных электронов, одиночно рожденных в протон–протонных (pp) столкновениях при энергии пучков в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Анализ проведен на наборе данных с интегральной светимостью $\mathcal{L}_{\text{int}} = 36.1 \text{ фб}^{-1}$, собранных за 2015 и 2016 года детекто-

ром ATLAS на Большом Адронном Коллайдере (ЛHC). Рождение возбужденных электронов в процессе $q\bar{q} \rightarrow ee^*$ происходит посредством контактного четырех-фермионного взаимодействия, а распад e^* — посредством калибровочного взаимодействия на W -бозон и электронное нейтрино ν . W -бозон распадается в адронном канале, что приводит к конечному состоянию $ee^* \rightarrow e\nu q\bar{q}$ (Рисунок 1). Кварки в распаде W -бозона в результате адронизации образуют адронные струи j . Для поиска возбужденного электрона применен подход со струями большого радиуса J , происходящими от пары коллимированных струй.

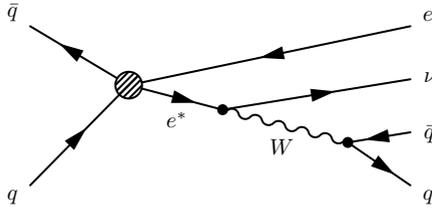


Рис. 1. Диаграмма Фейнмана для процесса рождения $ee^* \rightarrow e\nu q\bar{q}$.

Поиск дибозонных резонансов основан на расширенной модели Рэндалл–Сандрума (RS1) и расширенной калибровочной модели (EGM). В модели RS1 с искривленной конечной дополнительной размерностью возникают Калуца–Клейновские (КК) возбужденные состояния гравитона (G^*) [5]. Дополнительная размерность в модели RS1 ограничена двумя “бранами”: браной масштаба ТэВ, на которой находится четырехмерное пространство-время со всеми частицами и взаимодействиями Стандартной модели, и планковской браной, в “bulk” дополнительного измерения между которыми может распространяться только гравитационное взаимодействие. Данная модель характеризуется безразмерной константой связи k/\bar{M}_{Pl} (в данной работе выбрано значение $k/\bar{M}_{\text{Pl}} = 1$), где k — кривизна дополнительного измерения, а $\bar{M}_{\text{Pl}} = M_{\text{Pl}}/\sqrt{8\pi}$ — уменьшенная масса Планка.

В расширенной калибровочной модели [6] введены тяжелые калибровочные бозоны W'^{\pm} и Z' . Константы их взаимодействия с фермионами совпадают с константами Стандартной модели, а константа

при вершине взаимодействия тяжелого W' -бозона с W - и Z -бозонами равна константе SM при вершине $WW\gamma$, умноженной на коэффициент смешивания $\xi = c \times (m_W/m_{W'})^2$, где m_W и $m_{W'}$ — массы W - и W' -бозонов, соответственно, а $c = 1$ — поправочный коэффициент константы связи. Модель EGM имеет феноменологические свойства, присущие многим расширениям калибровочного сектора SM.

В данной работе обсуждается поиск узких дибозонных WW/WZ резонансов в столкновениях pp при энергии пучков в системе центра масс $\sqrt{s} = 8$ ТэВ на данных, полученных в эксперименте ATLAS на ЛHC за 2012 год с интегральной светимостью $\mathcal{L}_{\text{int}} = 20.3 \text{ фб}^{-1}$. На Рисунке 2 показаны диаграммы Фейнмана для процессов рождения G^* с распадом в W^+W^- (Рисунок 2, а) и W'^{\pm} в $W^{\pm}Z$ (Рисунок 2, б), где один W -бозон распадается в лептонном канале ($W \rightarrow \ell\nu$, где $\ell = e, \mu$), а второй W/Z -бозон — в адронном ($W/Z \rightarrow q\bar{q}'/q\bar{q}$, где $q, q' = u, d, c, s, b$). Конечные состояния распадов G^* и W' обозначены как $\ell\nu jj$ или $\ell\nu J$ (далее принято обозначение $\ell\nu jj/J$).

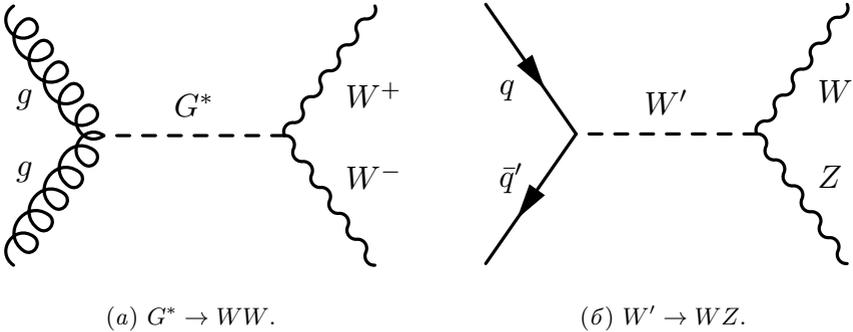


Рис. 2. Диаграммы Фейнмана ведущего порядка для процессов s -канального рождения $G^* \rightarrow WW$ (а) и $W' \rightarrow WZ$ (б).

Во второй главе приведено описание многофункционального детектора ATLAS [15] с его подсистемами, предназначенного для выполнения широкого спектра задач в области физики высоких энергий, как прецизионных измерений параметров Стандартной модели, так и поиска проявлений физики за ее пределами.

В детекторе ATLAS выбрана правая система координат с началом отсчета в номинальной точке взаимодействия пучков. Ось z определена направлением пучка, положительное направление оси x указывает в центр кольца ЛНС, ось y направлена вверх. Азимутальный угол ϕ измеряется в плоскости xy вокруг оси пучка, полярный угол θ отсчитывается от оси z в плоскости xz . Псевдобыстрота определена как $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$. Поперечные переменные, такие как поперечный импульс (p_T), поперечная энергия (E_T), потерянный поперечный импульс (E_T^{miss}) определены в плоскости xy . Угловой параметр в пространстве $\eta\phi$ задан выражением $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$.

Общая схема детектора представлена на Рисунке 3. Установка ATLAS имеет осевую симметрию относительно оси z с центром в точке взаимодействия пучков и зеркальную симметрию относительно плоскости xy . Система магнитов объединяет в себе тонкий сверхпроводящий соленоид, расположенный вокруг внутреннего детектора, и три больших азимутально симметричных сверхпроводящих тороида (один продольный и два торцевых), окружающих всю область калориметров. Завершающим внешним слоем детектора является мюонный спектрометр. Сбор и хранение данных осуществляется с помощью TDAQ — системы сбора данных и триггеров, состоящих из аппаратного триггера первого уровня L1 и программных триггеров второго уровня L2 и фильтра событий EF в первом периоде сбора данных (Run I) с 2009 по начало 2013 года при $\sqrt{s} = 7,8$ ТэВ. Во втором периоде сбора данных (Run II) с 2015 по 2018 года энергия пучков возросла до 13 ТэВ, а также выросли светимость и среднее число протон–протонных взаимодействий на одно пересечение сгустков протонов, поэтому триггерная система была модернизирована. Триггеры L2 и EF были объединены в единый триггер высокого уровня HLT [16].

В третьей главе описаны использованные в работе экспериментальные данные, моделирование сигнальных наборов данных, необходимых для оптимизации отбора событий в поисках EL и VV, и инструменты, использованные для моделирования основных фоновых процессов для сигнальных моделей EL и VV.

В поиске возбужденных электронов в конечном состоянии $e\nu J$

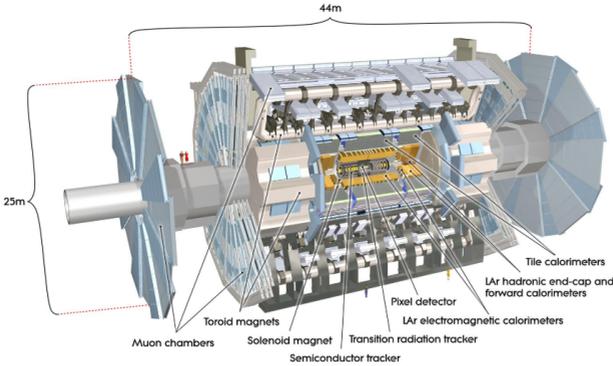


Рис. 3. Детектор ATLAS [15].

использованы данные, собранные на детекторе ATLAS на LHC в 2015–2016 годах в протон–протонных столкновениях с энергией пучков в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Полная интегральная светимость, полученная в периоды сбора данных при номинальной работе всех необходимых подсистем детектора в 2015 и 2016 годах, равна 36.1 фб^{-1} . Поиск дибозонных резонансов в конечном состоянии $l\nu jj/J$ проведен на данных детектора ATLAS, полученных в pp взаимодействиях с $\sqrt{s} = 8$ ТэВ за 2012 год с $\mathcal{L}_{\text{int}} = 20.3 \text{ фб}^{-1}$. Перечислены используемые триггеры для отбора событий реальных и смоделированных данных в поисках EL и VV.

Описаны детали моделирования наборов сигнальных событий для модели возбужденных электронов для электронного и мюонного¹ конечных состояний для масштаба составленности $\Lambda = 5$ ТэВ и диапазона масс возбужденного лептона (электрона или мюона) от 100 ГэВ до 1 ТэВ с шагом, равным 100 ГэВ, и от 1 ТэВ до 4 ТэВ с шагом в 250 ГэВ. В Приложении Б приведены проверочные распределения для различных кинематических переменных, полученные для частиц на уровне генератора, необходимые для качественной проверки достоверности смоделированных наборов данных для сигнальных процессов в поиске EL. В поиске дибозонных резонансов используе-

¹ Мюонный канал ($\mu\mu^* \rightarrow \mu\nu W(\rightarrow qq)$) далее в анализе не использовался.

мые сигнальные наборы данных в конечном состоянии $\ell\nu jj/J$ смоделированы для значений масс резонансов от 300 ГэВ до 2500 ГэВ с шагом, равным 100 ГэВ с константами $k/\bar{M}_{\text{P1}} = 1.0$ для модели гравитона Рэндалл–Сандрума RS1 G^* и $c = 1$ для тяжелого W' расширенной калибровочной модели EGM.

Перечислены генераторы, наборы функций распределения партонов (PDF), наборы параметров алгоритмов построения КХД-каскадов, фрагментации и адронизации, используемые для моделирования основных фоновых процессов. Доминирующими фоновыми процессами в поиске возбужденных электронов в конечном состоянии $e\nu J$ являются ассоциированное рождение $W (\rightarrow e\nu) + \text{jets}$ и рождение пары $t\bar{t}$. Меньший вклад в композицию фона вносят процессы рождения одиночного t -кварка (Single- t) (в Wt , s - и t -каналах), $W (\rightarrow \tau\nu) + \text{jets}$, $Z/\gamma^* + \text{jets}$ и дибозонов ($VV = WW/WZ/ZZ$). В поиске дибозонных резонансов в конечном состоянии $\ell\nu jj/J$ основной вклад вносит фоновый процесс рождения $W + \text{jets}$ с распадами W -бозонов в электронном, мюонном и τ -лептонном каналах. Далее по убыванию значимости следуют фоновые процессы $t\bar{t}$, Single- t , VV и $Z/\gamma^* + \text{jets}$.

В последних разделах главы описаны процедуры учета эффекта множественных взаимодействий, сопутствующих рассматриваемому событию (pile-up) и вычисления «весов» событий, используемых для улучшения согласования смоделированного фона с реальными данными.

Четвертая глава посвящена подробному описанию отбора отдельных объектов в событии и первичному отбору событий в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов. Приведены процедуры и критерии, требуемые для реконструкции, идентификации, изоляции и ассоциации с первичной вершиной² электронов и мюонов. Упомянуты алгоритмы *Antikt4* — реконструкции разрешенных в детекторе струй с радиусом $R = 0.4$ в поисках EL и VV, *Antikt10 (CA12)* — реконструкции тяжелых коллимированных струй с $R = 1.0$ ($R = 1.2$), и, кроме того, MV2 (MV1) — мечения b -струй

² Вершина с максимальным суммарным поперечным импульсом ассоциированных с ней треков.

в поиске EL (VV). Описана процедура реконструкции потерянной поперечной энергии, E_T^{miss} , в поисках EL и VV и метод мечения коллимированных *AntiKt10* струй из адронных распадов W -бозонов.

Перечислен первичный отбор событий, накладывающий следующие требования на отобранные объекты: в событии требуется наличие первичной вершины с как минимум тремя ассоциированными треками для анализа VV и двумя для анализа EL с поперечными импульсами $p_T > 400$ МэВ каждый. Устраняется двойной счет объектов, электронов, мюонов и струй, реконструированных с помощью более одного лептонного или струйного алгоритма, а также некорректная реконструкция реальных физических объектов, рожденных в непосредственной близости друг от друга. В поиске возбужденных электронов в событии требуется наличие хотя бы одной коллимированной струи *AntiKt10*, а для поиска дибозонных резонансов — как минимум двух разрешенных струй *AntiKt4* или как минимум одной коллимированной струи *CA12*. В соответствии с конечными состояниями в поисках EL и VV, в событиях требуется наличие ровно одного лептона, $n_e = 1$ в анализе EL и $n_e + n_\mu = 1$ в анализе VV, и ни одного дополнительного лептона с более слабыми критериями отбора в обоих анализах. В поиске возбужденных электронов на события накладываются требования на потерянную поперечную энергию, $E_T^{\text{miss}} > 100$ ГэВ, и инвариантную массу коллимированной струи, $m_J > 50$ ГэВ.

В пятой главе перечислены основные фоновые процессы в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов. Кроме описанных в третьей главе смоделированных фоновых процессов часть фона в обоих анализах составляют события с адронными струями, ошибочно идентифицированными как электроны (fake-электроны) и мюоны (fake-мюоны). Оценки вклада этих процессов проводятся из наборов реальных данных, обогащенных событиями с fake-лептонами. В поиске возбужденных электронов оценка фона fake-электронов производится с помощью матричного метода (ММ) [17; 18], а вклад от непряморожденных мюонов пренебрежимо мал. В поиске дибозонных резонансов оценка fake-фонов проводится в контрольных областях, что обсуждается ниже.

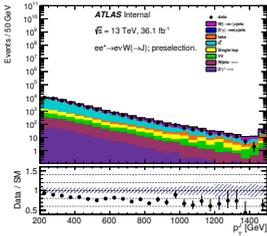
Полная композиция фоновых процессов в поиске возбужденных электронов после первичного отбора событий приведена в Таблице 1 и дополнительно проиллюстрирована на Рисунке 4 с распределениями по различным кинематическим переменным. Нормировка к данным не применялась. Указаны комбинированные статистические и систематические неопределенности. Композиция фоновых процессов в поиске дибозонных резонансов приведена в Таблице 2.

Таблица 1. Числа событий (N_{evt}) в фоновых процессах, нормированные на теоретическое сечение рождения фоновых процессов для 36.1 fb^{-1} , после *первичного* отбора. Вклад фоновых процессов в суммарную композицию фона (N_{total}) после *первичного* отбора представлен в %. Фон fake-электронов включает все источники событий с неправильно идентифицированными электронами. Такие события не учитываются в смоделированных данных для избежания двойного счета.

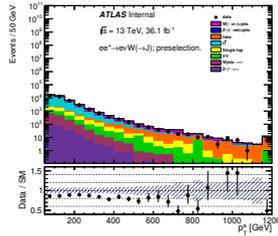
	N_{evt}	$N_{\text{evt}}/N_{\text{total}}$ [%]
$W(\rightarrow e\nu) + \text{jets}$	$(1218 \pm 96) \times 10$	27
$W(\rightarrow \tau\nu) + \text{jets}$	1291 ± 97	3
$Z/\gamma^*(\rightarrow ee) + \text{jets}$	$(7 \pm 2) \times 10$	<1
$Z/\gamma^*(\rightarrow \tau\tau) + \text{jets}$	$(26 \pm 3) \times 10$	<1
$t\bar{t}$	$(26 \pm 2) \times 10^3$	58
Single- t	$(26 \pm 2) \times 10^2$	6
VV	$(164 \pm 11) \times 10$	4
Fake-электроны	$(8 \pm 2) \times 10^2$	2

Шестая глава содержит описание выбора дискриминирующих переменных и построения сигнальных (SR), контрольных (CR) и проверочных областей (VR) в поисках EL и VV.

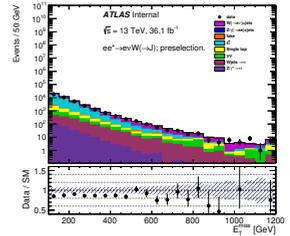
Выбраны дискриминирующие переменные для выделения областей фазового пространства, в которых доминирует выбранный фоновый или сигнальный процесс в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов. В поиске возбужденных электронов в конечном состоянии $e\nu J$ в качестве дискриминирующих переменных использованы инвариантная масса коллимированной тяжелой струи, m_J , поперечная масса нейтрино и коллимированной струи —



(a) p_T струи.



(б) p_T электрона.



(в) E_T^{miss} .

Рис. 4. Распределения по кинематическим переменным после первичного отбора для поиска возбужденных электронов.

Таблица 2. Вклады фоновых процессов (N_{evt}) после первичного отбора событий, нормированные на теоретическое сечение и интегральную светимость 20.3 fb^{-1} . В правой колонке показаны относительные вклады фоновых процессов в полное число фоновых событий (N_{total}).

каналы распада	N_{evt}		$N_{\text{evt}}/N_{\text{total}} [\%]$	
	e	μ	e	μ
$W + \text{jets}$	76853600	68530500	91	91
$Z/\gamma^* + \text{jets}$	6701340	6251600	8	8
$t\bar{t}$	491097	434220	< 1	< 1
Single- t	141017	124199	< 1	< 1
VV	119200	104315	< 1	< 1

кандидата в распадающийся в адроны W -бозон, $m_T^{\nu W}$, и абсолютное значение азимутального угла между электроном и нейтрино, $|\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})|$. В поиске дибозонных резонансов с конечным состоянием $\ell\nu jj/J$ выбраны следующие дискриминирующие переменные: инвариантная масса двух лидирующих в событии разрешенных струй, m_{jj} , или лидирующей коллимированной струи, m_J , поперечный импульс системы двух лидирующих в событии разрешенных струй, p_T^{jj} , или лидирующей коллимированной струи, p_T^J , поперечный импульс системы лептона и нейтрино, $p_T^{\ell\nu}$, абсолютное значение азимутального угла, $|\Delta\phi(\text{jet}, \vec{E}_T^{\text{miss}})|$, между лидирующей струей и нейтрино.

Сигнальные области (SR) определены путем максимизации чувствительности конкретной сигнальной области к сигнальному процессу, предсказанному моделью для конкретного значения m_{e^*} , или m_{G^*} , или $m_{W'}$ с учетом присутствия ненулевого фона от процессов SM в данной SR. В поиске возбужденных электронов эффективность отбора сигнала практически не зависит от параметра модели Λ , поэтому оптимизация SR проведена отдельно для каждого значения m_{e^*} , вместо двумерной $\{m_{e^*}, \Lambda\}$ оптимизации SR, путем максимизации модифицированного критерия значимости [19]:

$$Z = \sqrt{2 \times ((S + B) \times \ln(1 + S/B) - S)}, \quad (1)$$

где S и B — числа сигнальных и фоновых событий, соответственно, в оптимизируемой SR. В результате оптимизации условий отбора на дискриминирующие переменные $m_T^{\nu W}$ и $|\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})|$ для каждого значения m_{e^*} , всего построено девять SR, причем каждая SR оптимальна в своем, не перекрывающемся с другими, диапазоне значений m_{e^*} . Критерии на дискриминирующие переменные, определяющие SR, приведены в Таблице 3. Кроме этого, к событиям в SR применяются вето на наличие b -струй и условие мечения коллимированной струи как W -бозона с 50% вероятностью (W -tag50) (Таблица 4). Распределения для переменных $m_T^{\nu W}$, $|\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})|$ и m_J после первичного отбора событий и фита только фоновых процессов в SR показаны на Рисунке 5. Для поиска дибозонных резонансов были оптимизированы три сигнальные области: LRR с двумя разрешенными

низкоэнергетическими струями ($p_T^j > 30$ ГэВ), HRR с двумя разрешенными высокоэнергетическими струями ($p_T^j > 80$ ГэВ) и MR с одной коллимированной высокоэнергетической струей ($p_T^j > 400$ ГэВ). Конкретная сигнальная область применяется к m_{G^*} или $m_{W'}$, если она вносит не менее 10% от суммарной эффективности сигнала в данной массовой гипотезе. Для моделей дибозонных резонансов с массами 300–500 ГэВ применена LRR, 1200–2500 ГэВ — MR, 600–1100 ГэВ — комбинации сигнальных областей.

Таблица 3. Оптимизированные условия отбора, применяемые к дискриминирующим переменным после первичного отбора событий для определения сигнальных областей (SR). Каждая SR соответствует одной или нескольким массовым гипотезам, как показано во второй колонке. “Н/п” означает, что условие в данной SR не применяется.

	m_{e^*} [ГэВ]	$\min m_T^{\nu W}$ [ГэВ]	$\max m_T^{\nu W}$ [ГэВ]	$\min \Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}}) $ [радиан]
SR1	100	0	200	2.7
SR2	200	100	н/п	2.4
SR3	300	100	н/п	2.1
SR4	400	200	н/п	1.8
SR5	500	300	н/п	1.5
SR6	600	400	н/п	1.2
SR7	700	500	н/п	1.2
SR8	800 900	600	н/п	0.9
SR9	1000 1250 1500 1750 2000 2250 2500 2750 3000 3250 3500 3750 4000	700	н/п	0.9

Контрольные области (CR) построены таким образом, чтобы

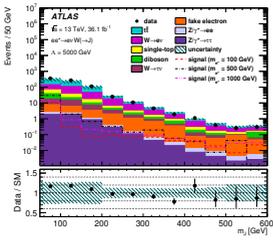
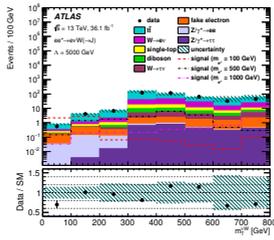
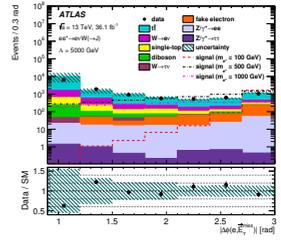
(a) m_J .(b) $m_T^{\nu W}$.(c) $|\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})|$.

Рис. 5. Распределения по переменным m_J (a), $m_T^{\nu W}$ (б) и $|\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})|$ (в), используемым для разделения сигнальных и фоновых процессов в поиске возбужденных электронов, показаны после первичного отбора событий. Вклады основных фоновых процессов уточнены путем сравнения с данными в соответствующих контрольных областях (CR). Сигнал смоделирован в предположении $\Lambda = 5 \text{ ТэВ}$. Последний вход гистограмм включает в себя информацию из последующих не показанных входов. В нижней части графиков показаны отношения данных с их статистической неопределенностью к предсказанным полным числам фоновых событий. Все систематические и статистические неопределенности, связанные с фоном SM, представлены в виде заштрихованной области.

обеспечить преобладание вклада соответствующего фонового процесса над остальными и статистически достаточное число фоновых событий в данной области при незначительном ожидаемом вкладе сигнального процесса. В CR производится измерение, позволяющее вычислить из данных поправку проинтегрированного по CR сечения соответствующего фонового процесса и его систематическую неопределенность для оценки вклада данного процесса в соответствующей SR. В поиске EL определены два набора CR в соответствии с двумя главными фоновыми процессами — $W (\rightarrow e\nu) + \text{jets}$ (W CR) и $t\bar{t}$ ($t\bar{t}$ CR) (Таблица 4). В результате, для девяти SR определены восемь W CR и девять $t\bar{t}$ CR. В поиске VV нормировка вклада основного фонового процесса $W + \text{jets}$ к данным вычисляется из распределения p_T^W в области, построенной с применением всех условий отбора LRR, кроме инвертированного критерия на инвариантную массу разрешенных струй, $40 < m_{jj} < 65$ ГэВ или $105 < m_{jj} < 200$ ГэВ. Нормировка вкладов фоновых процессов $W/Z + \text{jets}$ и fake-лептонов вычисляется с помощью контрольного набора данных, полученного для каждой сигнальной области отдельно для электронного и мюонного каналов. Нормировки вычисляются с помощью минимизации бинированного фита χ^2 для распределения E_T^{miss} .

Далее в главе описано построение проверочных областей (VR), в которых проведена проверка надежности оценки фона в SR по соответствующим CR. VR не включены в статистическую модель при поиске сигнала. В поиске EL построены два набора VR: m_J VR и $b\text{-jet}$ VR. Для определения m_J VR на события наложено инвертированное условие на m_J относительно SR и W CR. Для уменьшения статистической неопределенности условие на число b -струй опущено. При построении $b\text{-jet}$ VR требуется ровно одна b -струя для проверки применимости полученной нормировки фона $t\bar{t}$ из $t\bar{t}$ CR с двумя и более b -струями к SR без b -струй. Условия на $m_T^{\nu W}$ и $|\Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}})|$ для обоих наборов VR те же, что и в SR. В поиске VV построены fake VR для проверки корректности оценки фона fake-лептонов путем инверсии условия на E_T^{miss} , $E_T^{\text{miss}} < 30$ ГэВ для электронного канала и $50 < E_T^{\text{miss}} < 80$ ГэВ для мюонного канала, и $t\bar{t}$ VR требованием наличия хотя бы одной b -струй в событии.

Таблица 4. Условия отбора событий применяются после первичного отбора событий (PRE) в сигнальных областях (SR), контрольных областях (CR): W CR и $t\bar{t}$ CR, и в проверочных областях (VR): m_J VR и b -jet VR. W -tag50 и W -tag80 означают мечение коллимированной струи в качестве W -бозона с 50% (W -tag50) и 80% (W -tag80) эффективностью отбора сигнала. “н/п” означает, что условие в данной области не применяется.

Область	$D_2^{\beta=1}$	m_J интервал	$N^{b\text{-jets}}$	$m_T^{\nu W}$	$ \Delta\phi(e, \vec{E}_T^{\text{miss}}) $
PRE	W -tag50 проходит	н/п	н/п	н/п	н/п
SR	W -tag50 проходит	W -tag50 проходит	0	проходит	проходит
W CR	W -tag50 проходит	W -tag80 не проходит	0	проходит	н/п
$t\bar{t}$ CR	W -tag50 проходит	W -tag50 проходит	≥ 2	проходит	проходит
m_J VR	W -tag50 проходит	W -tag50 не проходит W -tag80 проходит	н/п	проходит	проходит
b -jet VR	W -tag50 проходит	W -tag50 проходит	1	проходит	проходит

В седьмой главе перечислены все систематические неопределенности, учитываемые в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов. Систематические неопределенности можно разделить на две категории: теоретические, связанные с предсказаниями оценок сигнальных и фоновых процессов, и экспериментальные. В Приложении К приведены подробные таблицы с вычисленными статистическими и систематическими неопределенностями в поиске E_L .

Перечислены все источники экспериментальных систематических неопределенностей, связанных с вычислениями интегральной светимости (2.1% для данных 2015+2016 годов в анализе E_L и 2.8% для данных 2012 года в анализе VV), с энергетической шкалой и энергетическим разрешением для электронов и мюонов, а также их триггерованием, реконструкцией и требованиями, наложенными для идентификации реконструированных объектов. Эти неопределенности не превышают нескольких процентов. Наибольшие экспериментальные неопределенности, достигающие 20%, в поиске возбужденных электронов связаны с реконструкцией тяжелых коллимированных струй, b -струй (в $t\bar{t}$ CR) и энергетической шкалой и разрешением мягких струй. Кроме того, учтены неопределенности, связанные с реконструкцией потерянной поперечной энергии.

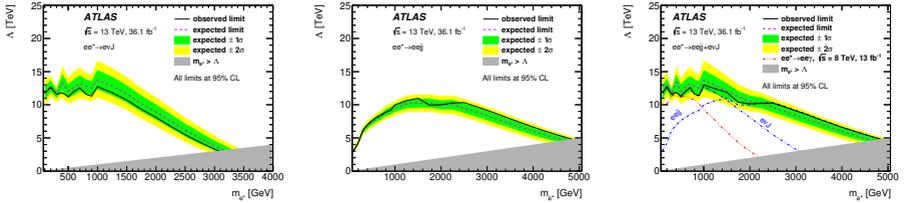
Описаны теоретические неопределенности для смоделированных фоновых и сигнальных наборов данных, источники которых связаны с выбором набора PDF, значения α_s , оценкой вклада неучтенных поправок высших порядков в пертурбативных вычислениях. Последний эффект оценивается путем вариации перенормировочных и факторизационных параметров в пределах 1.5–2 от их номинальных значений. Влияние неопределенности α_s оценивается путем варьирования номинального значения $\alpha_s = 0.118$ на ± 0.001 . Теоретические неопределенности для фоновых и сигнальных процессов в анализе E_L достигают 10%. Основным источником неопределенности сигнала в поиске VV является учет излучения в начальном (конечном) состоянии. Эта неопределенность достигает 12% (6%) для $G^* (W')$.

В восьмой главе обсуждаются статистическая модель и результаты, полученные в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов.

зонных резонансов.

В поиске возбужденных электронов проведен простой счетный эксперимент, основанный на максимизации функции правдоподобия, в которую входят компоненты фоновых и сигнальных процессов в сигнальных и контрольных областях, нормировочные параметры для основных фоновых процессов. Все статистические и систематические неопределенности включены в статистическую модель как мешающие параметры. Получены ограничения сверху (UL) на параметр силы сигнала μ и сечение рождения e^* , умноженное на вероятность распада $e^* \rightarrow \nu W$, $\sigma \times \mathcal{B}$, в зависимости от m_{e^*} методом доверительных интервалов (CL_s) [20] в асимптотическом приближении. Приведены значения p_0 в поиске EL для моделей сигнала с $m_{e^*} = 100$ ГэВ – 4 ТэВ. Отклонения реальных данных от предсказаний Стандартной модели лежат в пределах 1σ для всех сигнальных областей.

Ограничение снизу (LL) на Λ в зависимости от m_{e^*} , полученное для конечного состояния $e\nu J$ на уровне значимости $CL = 95\%$ показано на Рисунке 6, а. На Рисунке 6, б показано ограничение снизу на Λ , полученное для конечного состояния $eejj$ [2] другими авторами в анализе данных эксперимента ATLAS, проведенном параллельно с поиском в конечном состоянии $e\nu J$. Информация из обоих поисков использована для построения единой функции правдоподобия для каждого значения m_{e^*} для получения комбинированного нижнего ограничения на Λ , показанного на Рисунке 6, в вместе с индивидуальными ограничениями, полученными для конечных состояний $e\nu J$ и $eejj$, а также ограничением на Λ , полученным коллаборацией ATLAS в поиске одиночного рождения e^* с последующим распадом $e^* \rightarrow e\gamma$ при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ [21]. Ограничение снизу на Λ для значений $m_{e^*} \leq 1.5$ ТэВ приблизительно равно 11 ТэВ, при значениях $m_{e^*} = 4$ ТэВ ограничение падает до 7 ТэВ. На характерной границе применимости эффективной теории поля для вычисления сечения одиночного рождения e^* , $m_{e^*} = \Lambda$, значения $m_{e^*} < 4.8$ ТэВ исключены. Комбинация поисков одиночного рождения e^* в конечных состояниях $e\nu J$ и $eejj$ позволила значительно улучшить ограничения на масштаб составленности Λ по сравнению с результатами, полученными в LHC Run I в экспериментах ATLAS и CMS [22; 23].



(*a*) Λ^{LL} , полученное в конечном состоянии νJ . (*б*) Λ^{LL} , полученное в конечном состоянии $eejj$. (*в*) Λ^{LL} , полученное комбинацией νJ и $eejj$.

Рис. 6. Ограничения снизу на Λ в зависимости от m_{e^*} для конечных состояний νJ (*a*), $eejj$ (*б*) и в результате их комбинации (*в*). Полосы неопределенностей в $\pm 1(2)\sigma$ (*б*) и (*в*) вокруг ожидаемого ограничения получены с учетом всех источников систематических и статистических неопределенностей. Ограничения при $m_{e^*} > 4$ ТэВ получены экстраполяцией. На Рисунке 6, *в* голубыми штрих-пунктирными линиями показаны наблюдаемые ограничения, полученные индивидуально в конечных состояниях νJ (см. (*a*)) и $eejj$ (см. (*б*)). Красной пунктирной линией показано ограничение на Λ , полученное коллаборацией ATLAS в поиске одиночного рождения e^* с последующим распадом $e^* \rightarrow e\gamma$ в столкновениях pp при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ с интегральной светимостью 13 фб^{-1} [21].

В поиске дибозонных резонансов для каждой сигнальной модели G^* и W' максимизация функции правдоподобия проведена для распределения полной инвариантной массы резонанса ($m_{\ell\nu jj/J}$). События рождения дибозонных резонансов не были обнаружены. Получены ограничения сверху на уровне значимости 95% на $\sigma \times \mathcal{B}$ в зависимости от масс G^* (Рисунок 7, *a*) и W' (Рисунок 7, *б*). На уровне значимости 95% исключены значения массы тяжелого гравитона модели RS1 $m_{G^*} < 760$ ГэВ и массы W' -бозона модели EGM $m_{W'} < 1490$ ГэВ. Полученные результаты значительно превосходят предыдущие, полученные на детекторе ATLAS при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в таком же конечном состоянии [24].

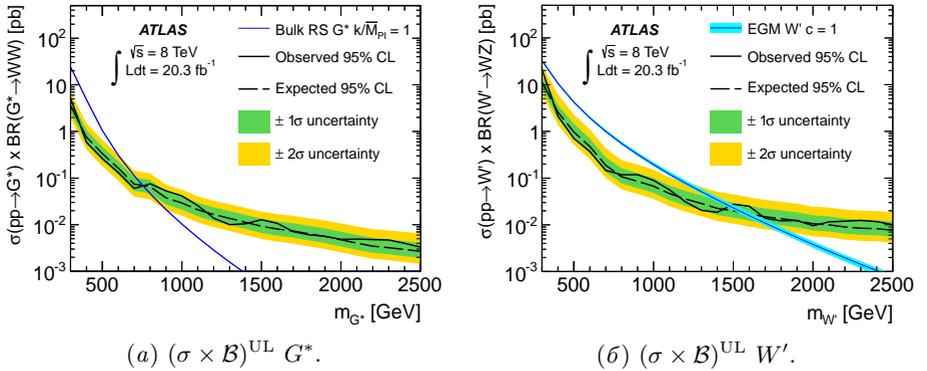


Рис. 7. Наблюдаемые и ожидаемые с 95% CL ограничения сверху на $\sigma \times \mathcal{B}$ в зависимости от масс RS G^* (*a*) и EGM W' (*б*), полученные в поиске дибозонных резонансов. Теоретические сечения рождения G^* (W') вычислены в приближении LO (NNLO). Полосы неопределенностей в $\pm 1(2)\sigma$ (*a*) и (*б*) вокруг ожидаемого ограничения вычислены с учетом всех источников систематических и статистических неопределенностей. Полоса вокруг теоретической кривой сечения рождения W' отражает теоретическую неопределенность вычислений в приближении NNLO.

В заключении перечислены полученные результаты диссертационной работы:

1. Обоснован выбор полулептонного конечного состояния с электроном, нейтрино и W -бозоном, распадающимся в адроны, ($e\nu J$)

для поиска возбужденных электронов на данных, полученных на детекторе ATLAS на LHC в протон–протонных столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.

2. Смоделированы и проверены на достоверность сигнальные наборы данных для поиска возбужденных электронов в событиях с электроном, нейтрино и W -бозоном.
3. Оптимизированы условия отбора объектов и первичный отбор событий в поиске возбужденных электронов в конечном состоянии $e\nu J$ в протон–протонных столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в детекторе ATLAS.
4. Оценен вклад фоновых процессов в поиске возбужденных электронов в событиях $e\nu J$ в протон–протонных столкновениях в детекторе ATLAS при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
5. Выбраны дискриминирующие переменные и построены сигнальные, контрольные и проверочные области в поиске возбужденных электронов в событиях $e\nu J$ в протон–протонных взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
6. Получена оценка систематических неопределенностей в поиске возбужденных электронов в событиях $e\nu J$ на данных, полученных на детекторе ATLAS на LHC в протон–протонных столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
7. Проведен статистический анализ для проверки модели рождения возбужденных электронов с конечным состоянием $e\nu J$ на данных, полученных в протон–протонных столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в детекторе ATLAS на LHC с полной интегральной светимостью $\mathcal{L}_{\text{int}} = 36.1$ фб $^{-1}$. Отклонения реальных данных от предсказаний Стандартной модели обнаружены не были, отклонения лежат в пределах 1σ для всех значений m_{e^*} в модели сигнала. Поставлены ограничения сверху на параметры сигнальной модели: силу сигнала, μ , и сечение одиночного рождения e^* , умноженное на вероятность распада $e^* \rightarrow \nu W$,

$\sigma \times \mathcal{B}$, в зависимости от значения m_{e^*} . Из ограничений на μ и $\sigma \times \mathcal{B}$ получено ограничение снизу на масштаб составленности Λ в зависимости от m_{e^*} . Скомбинированы результаты поисков возбужденных электронов в конечных состояниях $e\nu J$ и $eejj$. Это позволило установить нижнее ограничение с 95% уровнем значимости на Λ , равный 11 ТэВ для $m_{e^*} \leq 1.5$ ТэВ, и 7 ТэВ для $m_{e^*} = 4$ ТэВ, а в специальном случае $m_{e^*} = \Lambda$, исключить массы меньше 4.8 ТэВ. Комбинация двух конечных состояний позволила усилить ограничения по сравнению с результатами, полученными в LHC Run I на детекторах ATLAS и CMS.

8. Оптимизированы условия отбора объектов и первичный отбор событий в поиске дибозонных резонансов в конечном состоянии с лептоном (электроном или мюоном), нейтрино и струями на данных, полученных на детекторе ATLAS в протон–протонных столкновениях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ.

Основные публикации по теме диссертации

1. *Cheremushkina E.* Semileptonic (lepton, neutrino and jets) WW/WZ resonances searches at $\sqrt{s} = 8$ and 13 TeV with the ATLAS detector at the LHC // *Phys. Part. Nucl.* — 2017. — Т. 48, № 5. — 752—754. 3 p. — DOI: [10.1134/S1063779617050100](https://doi.org/10.1134/S1063779617050100). — URL: <https://cds.cern.ch/record/2304070>.
2. *ATLAS Collaboration.* Search for excited electrons singly produced in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment at the LHC // *Eur. Phys. J. C.* — 2019. — Т. 79, № 9. — С. 803. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-019-7295-1](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7295-1). — arXiv: [1906.03204](https://arxiv.org/abs/1906.03204) [[hep-ex](#)].
3. *ATLAS Collaboration.* Search for production of WW/WZ resonances decaying to a lepton, neutrino and jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector // *Eur. Phys. J. C.* — 2015. — Т. 75, № 5. — С. 209. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3593-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3593-4), [10.1140/epjc/s10052-015-3425-6](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3425-6). — arXiv: [1503.04677](https://arxiv.org/abs/1503.04677) [[hep-ex](#)]. — [Erratum: *Eur. Phys. J.C*75,370(2015)].

Цитированная литература

4. *Baur U., Spira M., Zerwas P. M.* Excited-quark and -lepton production at hadron colliders // *Phys. Rev. D.* — 1990. — Т. 42. — С. 815—824. — DOI: [10.1103/PhysRevD.42.815](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.42.815).
5. *Agashe K.* [и др.]. Warped Gravitons at the CERN LHC and beyond // *Phys. Rev. D.* — 2007. — Т. 76. — С. 036006. — DOI: [10.1103/PhysRevD.76.036006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.76.036006). — arXiv: [hep-ph/0701186](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0701186) [[hep-ph](https://arxiv.org/abs/hep-ph)].
6. *G. Altarelli B. M., Ruiz-Altaba M.* Searching for new heavy vector bosons in $p\bar{p}$ colliders // *Z. Phys. C.* — 1989. — Т. 45. — С. 109. — DOI: [10.1007/BF01556677](https://doi.org/10.1007/BF01556677).
7. *Cheremushkina E.* Semileptonic WW/WZ resonance search at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector at the LHC. — 2015. — Сент. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2049868>.
8. *Milic A.* Searches for new phenomena in final states involving leptons and jets using the ATLAS detector. — 2019. — Июль. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2684390>.
9. *Cheremushkina E.* Semileptonic (lepton, neutrino and jets) WW/WZ resonances search at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector at the LHC : тех. отч. / CERN. — Geneva, 12.2015. — ATL-PHYS-PROC-2015—171. — DOI: [oai : cds . cern . ch : 2111163](https://cds.cern.ch/record/2111163). — URL: <https://cds.cern.ch/record/2111163>.
10. *Pati J. C., Salam A.* Lepton number as the fourth “color” // *Phys. Rev. D.* — 1974. — Т. 10. — С. 275—289. — DOI: [10.1103/PhysRevD.10.275](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.10.275). — Erratum: // *Phys. Rev. D.* — 1975. — Т. 11. — С. 703. — DOI: [10.1103/PhysRevD.11.703.2](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.11.703.2).
11. *Kayser B., Shrock R. E.* Distinguishing between Dirac and Majorana neutrinos in neutral-current reactions // *Phys. Lett. B.* — 1982. — Т. 112. — С. 137—142. — DOI: [10.1016/0370-2693\(82\)90314-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)90314-8).
12. *Eichten E., Lane K. D., Peskin M. E.* New Tests for Quark and Lepton Substructure // *Phys. Rev. Lett.* — 1983. — Т. 50. — С. 811—814. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.50.811](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.811).

13. *Cabibbo N., Maiani L., Srivastava Y.* Anomalous Z decays: excited leptons? // *Phys. Lett. B.* — 1984. — T. 139. — C. 459–463. — DOI: [10.1016/0370-2693\(84\)91850-1](https://doi.org/10.1016/0370-2693(84)91850-1).
14. *Hagiwara K., Zeppenfeld D., Komamiya S.* Excited lepton production at LEP and HERA // *Z. Phys. C.* — 1985. — T. 29. — C. 115. — DOI: [10.1007/BF01571391](https://doi.org/10.1007/BF01571391).
15. *ATLAS Collaboration.* The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // *JINST.* — 2008. — T. 3. — S08003. — DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003).
16. *ATLAS Collaboration.* Performance of the ATLAS trigger system in 2015 // *Eur. Phys. J. C.* — 2017. — T. 77, № 5. — C. 317. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-017-4852-3](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4852-3). — arXiv: [1611.09661](https://arxiv.org/abs/1611.09661) [[hep-ex](https://arxiv.org/abs/1611.09661)].
17. *Hayden D.* [и др.]. Search for new high-mass resonances in the dilepton final state using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector : тех. отч. / CERN. — Geneva, 05.2016. — ATL-COM-PHYS-2016—453. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2151267>.
18. LPX Matrix Method : тех. отч. — URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasProtected/LPXMatrixMethod>.
19. *G. Cowan and K. Cranmer and E. Gross and O. Vitell.* Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics // *Eur. Phys. J. C.* — 2011. — T. 71. — C. 1554. — 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](https://arxiv.org/abs/1007.1727)]. — Erratum: *Cowan G.* [и др.] // *Eur. Phys. J. C.* — 2013. — T. 73. — C. 2501. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-013-2501-z](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2501-z).
20. *Read A. L.* Presentation of search results: The CL_s technique // *J. Phys. G.* — 2002. — Vol. 28. — P. 2693–2704. — DOI: [10.1088/0954-3899/28/10/313](https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/10/313).
21. *ATLAS Collaboration.* Search for excited electrons and muons in $\sqrt{s} = 8$ TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector // *New J. Phys.* — 2013. — T. 15. — C. 093011. — DOI: [10.1088/1367-2630/15/9/093011](https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/9/093011). — arXiv: [1308.1364](https://arxiv.org/abs/1308.1364) [[hep-ex](https://arxiv.org/abs/1308.1364)].

22. *ATLAS Collaboration*. Search for new phenomena in events with three or more charged leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector // JHEP. — 2015. — Т. 08. — С. 138. — DOI: [10.1007/JHEP08\(2015\)138](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2015)138). — arXiv: [1411.2921](https://arxiv.org/abs/1411.2921) [hep-ex].
23. *CMS Collaboration*. Search for excited leptons in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP. — 2016. — Т. 03. — С. 125. — DOI: [10.1007/JHEP03\(2016\)125](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2016)125). — arXiv: [1511.01407](https://arxiv.org/abs/1511.01407) [hep-ex].
24. *ATLAS Collaboration*. Search for resonant diboson production in the $WW/WZ \rightarrow \ell\nu jj$ decay channels with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV // Phys. Rev. D. — 2013. — Т. 87, № 11. — С. 112006. — DOI: [10.1103/PhysRevD.87.112006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.112006). — arXiv: [1305.0125](https://arxiv.org/abs/1305.0125) [hep-ex].

Рукопись поступила 23 марта 2020 года.

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

Черемушкина Евгения Вадимовна.

Поиск возбужденных электронов и дибозонных резонансов в конечном состоянии с лептоном, нейтрино и струями на детекторе ATLAS на LHC.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Подписано к печати 25.03.2020. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 2. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 100. Заказ 7. Индекс 3649.

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

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, 2020
