

На правах рукописи



**Соловьев Виктор Михайлович**

**Поиск тяжелых заряженных векторных бозонов в канале распада  
на электрон и нейтрино в эксперименте ATLAS**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
**Федин Олег Львович**

Официальные оппоненты: **Баранов Сергей Павлович**,  
доктор физико-математических наук,  
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, отделение ядерной физики и астрофизики, ведущий научный сотрудник

**Дьяченко Александр Трофимович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор,  
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Физика», профессор

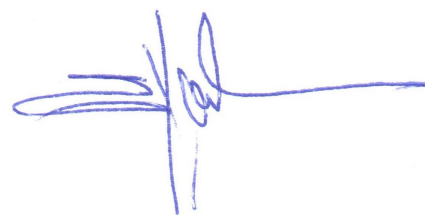
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится 29 ноября 2017 г. в 17 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.29,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



Ермакова Наталья Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в физике элементарных частиц для описания частиц и их взаимодействий используется так называемая Стандартная модель (СМ), которая, как известно, хорошо описывает экспериментальные данные. До сих пор не обнаружено никаких значимых расхождений экспериментальных данных с предсказаниями СМ. До недавнего времени последней неоткрытой частицей, предсказываемой в рамках СМ, был бозон Хиггса. В 2012 году его существование было экспериментально подтверждено коллаборациями ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере (англ., Large Hadron Collider, LHC). Открытие бозона Хиггса стало еще одним доказательством успешности СМ. Однако существует ряд экспериментальных и теоретических указаний на неполноту СМ. Так, например, СМ не включает в себя гравитационное взаимодействие, не объясняет существующую асимметрию материи и антиматерии, нейтринные осцилляции. Кроме того, в СМ существует широко известная «проблема иерархии» масс и масштабов взаимодействий. Таким образом существуют объективные предпосылки как для развития теоретических моделей, выходящих за рамки СМ, так и для поиска экспериментальных доказательств существования физических явлений, не описывающихся в рамках СМ.

Во многих моделях, обобщающих СМ, предсказывается существование тяжелых калибровочных бозонов. К таким моделям, например, модели великого объединения, модели Калуцы-Клейна и др. Заряженные и нейтральные калибровочные бозоны, которые появляются в этих моделях, принято обозначать  $W'$  и  $Z'$  соответственно. В данной диссертации рассматриваются заряженные  $W'$ -бозоны. Эти бозоны, как и калибровочные  $W$ -бозоны СМ, имеют заряд  $\pm 1$  и спин 1.

Другая модель, рассматриваемая в данной диссертации, — это киральные бозоны  $W^*$ , которые также имеют заряд  $\pm 1$  и спин 1. Однако в отличие от  $W'$ -бозонов, которые связаны с фермионами через векторный ток,  $W^*$ -бозоны связаны с фермионами через тензорный ток. Разница во взаимодействии приводит к тому, что  $W'$ - и  $W^*$ -бозоны имеют сильно отличающиеся кинематические распределения продуктов их распада. Отличия в кинематических распределениях могут быть использованы для модельно-зависимого анализа в случае, если новые бозоны будут открыты. Появление таких бозонов в новых теоретических моделях помогает решить проблему иерархии

СМ.

Протон-протонные соударения при высоких энергиях на коллайдере ЛНС предоставляют уникальную возможность для поиска явлений новой физики за пределами СМ, в том числе и для поиска новых тяжелых векторных  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов. Открытие таких бозонов или исключение их существования в определенном диапазоне масс является важным экспериментальным результатом для физики высоких энергий, определяющим дальнейшее развитие теоретических моделей. Одним из наиболее простых процессов для поиска  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов является их распад на электрон и нейтрино, который рассматривается в данной диссертации. Этот канал распада имеет простую сигнатуру события: одиночный изолированный электрон и недостающую энергию в детекторе, а также хорошее соотношение сигнала и фона.

**Цели и задачи исследования.** Цель данной работы состояла в поиске тяжелых векторных бозонов  $W'$  и  $W^*$  в канале их распада на электрон и нейтрино в данных, накопленных экспериментом ATLAS в 2012 году при энергии столкновений протонов в системе центра масс 8 ТэВ. В том случае, если такие бозоны не удастся обнаружить, устанавливались верхние пределы на сечения их рождения,  $\sigma(pp \rightarrow W')$  и  $\sigma(pp \rightarrow W^*)$ , умноженные на вероятности их распада на электрон и нейтрино,  $B(W' \rightarrow e\nu)$  и  $B(W^* \rightarrow e\nu)$ . После сравнения измеренных сечений с теоретическими сечениями определялись нижние границы по массе, ниже которых с уровнем достоверности 95% рождение таких бозонов не наблюдается.

При выполнении данной работы были решены следующие задачи:

1. Разработаны и оптимизированы критерии отбора событий для поиска  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов в данных эксперимента ATLAS.
2. Разработано программное обеспечение (ПО) для отбора событий распада  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов на электрон и нейтрино.
3. Используя разработанное ПО, отобраны события в данных, накопленных в эксперименте ATLAS в 2012 году, удовлетворяющие выбранным критериям отбора событий.
4. Определен вклад в фон событий для основных процессов СМ. С этой целью события этих процессов, моделированные методом Монте-Карло,

проходили отбор с помощью ПО, разработанного для поиска распадов  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов на электрон и нейтрино.

5. Выполнена оценка систематических ошибок фона от процессов СМ, вклад которого определялся с помощью моделирования.
6. Выполнено сравнение кинематических распределений, полученных путем отбора событий в экспериментальных данных и в моделированных событиях для процессов СМ, дающих вклад в фон. В результате сравнения полученных распределений, показано отсутствие статистически значимых отклонений экспериментальных данных от фона.
7. Так как в экспериментальных данных не наблюдалось отклонений от расчетов, выполненных в рамках СМ, были установлены верхние пределы на сечения  $\sigma(pp \rightarrow W')B(W' \rightarrow e\nu)$  и  $\sigma(pp \rightarrow W^*)B(W^* \rightarrow e\nu)$  в зависимости от массы бозонов. Используя измеренные зависимости верхних пределов для  $\sigma(pp \rightarrow W')B(W' \rightarrow e\nu)$  и  $\sigma(pp \rightarrow W^*)B(W^* \rightarrow e\nu)$  от массы, а также вычисленные теоретические зависимости этих сечений от массы, были установлены нижние пределы по массе на существование  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов.
8. Результаты поиска  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов в канале их распада на электрон и нейтрино были проанализированы совместно с результатами в канале их распада на мюон и нейтрино. В результате были установлены пределы на сечения  $\sigma(pp \rightarrow W')B(W' \rightarrow \ell\nu)$  и  $\sigma(pp \rightarrow W^*)B(W^* \rightarrow \ell\nu)$  в зависимости от массы и нижние пределы по массе на существование  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов в лептонном канале их распада.

### Научная новизна:

1. Впервые в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра масс 8 ТэВ осуществлен поиск  $W^*$ -бозонов в канале их распада на электрон и нейтрино.
2. Полученные в работе пределы на сечения рождения и массы  $W^*$ -бозонов являются наилучшими из существующих на данный момент.

3. Впервые в эксперименте ATLAS в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра масс 8 ТэВ осуществлен поиск  $W'$ -бозонов в канале их распада на электрон и нейтрино.
4. Установлены новые, более сильные, пределы на сечения рождения и массы  $W'$ -бозонов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Поиск тяжелых векторных  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов представляет собой экспериментальную проверку теоретических гипотез, выходящих за рамки СМ. Такого рода исследования чрезвычайно важны для современной теоретической физики. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы для корректировки соответствующих теоретических гипотез, и, возможно, для выдвижения новых.

В ходе выполнения работы был накоплен практический опыт обработки и статистического анализа данных и моделированных событий. Разработанное для этих целей ПО может быть использовано для поиска новых тяжелых векторных бозонов в будущем.

**Методология и метод исследований.** В диссертации исследовались процессы  $pp \rightarrow W' \rightarrow e\nu$  и  $pp \rightarrow W^* \rightarrow e\nu$ . В таких процессах в конечном состоянии наблюдается один электрон и нейтрино. Вследствие того, что нейтрино не взаимодействует с веществом детектора, полностью реконструировать его импульс не представлялось возможным. Вместо этого реконструировалась так называемая недостающая поперечная энергия (англ., missing  $E_T$ ) в событии,  $E_T^{\text{miss}}$ , уносимая нейтрино. Информации о  $E_T^{\text{miss}}$  было недостаточно для восстановления инвариантной массы пары электрон-нейтрино. Поэтому в качестве наблюдаемой величины в данной работе использовалась поперечная масса, которая определялась следующим образом:

$$m_T = \sqrt{2p_T^e E_T^{\text{miss}}(1 - \cos \varphi_{e\nu})},$$

где  $p_T^e$  — поперечный импульс электрона,  $E_T^{\text{miss}}$  — недостающая поперечная энергия в событии,  $\varphi_{e\nu}$  — азимутальный угол между импульсом электрона и нейтрино.

Для поиска  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов отбирались события в данных с большой

недостающей энергией  $E_T^{\text{miss}}$ , содержащие один электрон с большим  $p_T$ . Кинематические распределения для отобранных событий в данных сравнивались с аналогичными распределениями для фоновых процессов. Фоновые процессы оценивались методом Монте-Карло моделирования, за исключением фона от двухструйных событий, оценка которого выполнялась с использованием экспериментальных данных. Исходя из этого сравнения делался вывод о наличии, либо об отсутствии статистически значимых отклонений данных от предсказаний СМ.

Для определения верхних пределов на сечения рождения  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов использовался байесовский подход. Такой подход основан на известной теореме Байеса, определяющей вероятность наступления одного событий при условии наступления другого. Байесовский подход для нахождения пределов широко используется в математической статистике и является альтернативным частотному подходу. Результаты, полученные в рамках этих двух подходов, в общем случае могут не совпадать. Однако в данной работе использовался частный случай байесовского подхода, для которого математически можно доказать, что верхние пределы для этих двух подходов совпадают. В рамках байесовского подхода в данной работе для каждой рассматриваемой гипотетической массы новых тяжелых бозонов определялся порог по поперечной массе, выше которого производилось сравнение числа событий в данных с числом фоновых событий, предсказанных в рамках СМ. Пределы на массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов определялись исходя из теоретических сечений рождения таких бозонов и экспериментально измеренных пределов на эти сечения.

### Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты измерения эффективности идентификации электронов с большим поперечным импульсом и эффективности работы триггера для регистрации таких электронов для данных и моделированных событий в зависимости от поперечных импульсов и псевдобыстрот электронов. Результаты вычисления поправочных коэффициентов для моделированных событий, учитывающих разницу в этих эффективностях, в зависимости от поперечных импульсов и псевдобыстрот электронов.
2. Результаты выбора и оптимизации для поиска  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов критериев отбора событий, содержащих один электрон с большим поперечным импульсом и большую недостающую поперечную энергию.

3. Результаты оценки фона для рассматриваемых сигнальных процессов при помощи моделированных методом Монте-Карло событий, удовлетворяющих оптимизированным критериям отборов.
4. Результаты оценки систематических ошибок для числа отобранных фоновых событий и эффективностей отбора сигнальных событий.
5. Результаты статистического анализа совместимости экспериментальных данных с предсказаниями СМ.
6. Результаты определения оптимальных порогов по поперечной массе, которые использовались в байесовском анализе для определения пределов на сечения  $\sigma(pp \rightarrow W')B(W' \rightarrow e\nu)$  и  $\sigma(pp \rightarrow W^*)B(W^* \rightarrow e\nu)$ , и ограничений на массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов.
7. Верхние пределы на сечения  $\sigma(pp \rightarrow W')B(W' \rightarrow e\nu)$  и  $\sigma(pp \rightarrow W^*) \times B(W^* \rightarrow e\nu)$ , и нижние пределы на массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов, ниже которых с уровнем достоверности 95% рождение таких бозонов не наблюдается.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Результаты диссертации были представлены на международных конференциях «New Trends in High-Energy Physics» (23 — 29 сентября 2013 года, Алушта, Крым, Украина), «Hadron Structure and QCD» (30 июня — 4 июля 2014 года, Гатчина) и «The Third Annual Large Hadron Collider Physics» (31 августа — 5 сентября 2015 года, С.-Петербург).

Работа неоднократно обсуждалась на рабочих совещаниях эксперимента ATLAS в ЦЕРН, на семинарах Отделения физики высоких энергий ФГБУ ПИЯФ им. Б.П. Константинова, а также на совещаниях российских институтов, входящих в коллаборацию ATLAS.

Материалы диссертации опубликованы в трех работах [1, 2, 3], индексируемых в базах данных SCOPUS и WEB OF SCIENCE, и в тезисах трех докладов на международных научных конференциях [4, 5, 6].

Работа выполнена при поддержке Правительства Ленинградской области «Именная научная стипендия Губернатора Ленинградской области».



**Личный вклад автора.** Автор принимает участие в работе по поиску лептонных распадов  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов с 2010 года. Его личный вклад в анализ данных по поиску таких бозонов в канале их распада на электрон и нейтрино является определяющим. Им были получены основные результаты проводившихся исследований для данных, накопленных в 2011 и 2012 годах. На всем протяжении выполнения данной работы автор являлся координатором рабочей группы коллаборации ATLAS по поиску  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов. При его непосредственном участии были подготовлены к публикации статьи [1, 2, 3, 7]. Представленные в диссертации результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 138 страниц, включая 43 рисунка, 29 таблиц и список литературы из 89 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлены ее цели и задачи, кратко описан метод исследования. Показаны научная новизна, практическая и теоретическая значимость результатов работы, приведены сведения об их апробации. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан теоретический обзор моделей, в которых появляются калибровочные бозоны  $W'$  и киральные бозоны  $W^*$ . Существование дополнительных калибровочных бозонов предсказывается во многих моделях, выходящих за рамки СМ. Один из классов таких моделей [8, 9, 10] был разработан в рамках Теорий великого объединения. Все эти модели основаны на калибровочных симметриях более высокого порядка, чем калибровочная симметрия СМ, которые спонтанно нарушаются до симметрии СМ. Для построения таких моделей используются, например, группы  $SO(10)$ ,  $E_6$  и др. Расширение группы симметрии приводит к появлению дополнительных калибровочных бозонов. Новые калибровочные бозоны возникают также и в так называемых моделях «малого Хиггса» [11, 12]. В этом классе моделей группа симметрии СМ расширяется до группы  $SU(5)$ , а бозон Хиггса представляет

собой псевдо-голдстоуновский бозон, который появляется вследствие спонтанного нарушения этой расширенной симметрии. Другими моделями, предсказывающими существование тяжелых калибровочных бозонов, являются, к примеру, модели Калуцы-Клейна [13, 14, 15]. В этих моделях делается попытка объединения электромагнитного и гравитационного взаимодействий путем введения дополнительных измерений. Вследствие этого могут возникать так называемые возбужденные состояния калибровочных бозонов Калуцы-Клейна. В эксперименте такие состояния будут проявляться как тяжелые резонансы. Такое множество моделей, предсказывающих существование новых калибровочных бозонов, требует проведения отдельного физического анализа данных для каждой конкретной теоретической модели. Однако чаще всего для поиска новых бозонов выбирают одну или несколько основных моделей. В данной работе в качестве основной модели была выбрана так называемая последовательная стандартная модель (англ., Sequential Standard Model, SSM) [16]. Эта модель не является физической моделью как таковой и вводится только для поиска новых тяжелых бозонов. В ней предполагается, что новые бозоны взаимодействуют с фермионами так же как и  $W$ - и  $Z$ -бозоны СМ. Таким образом, лагранжиан взаимодействия  $W'$ -бозонов с фермионами аналогичен лагранжиану взаимодействия  $W$ -бозонов СМ с фермионами. В этом случае ширина бозона для моды распада на заряженный лептон и нейтрино линейно возрастает с массой. В этой модели также предполагается, что  $W'$ -бозон не взаимодействует с  $W$ - и  $Z$ -бозонами, и следовательно процесс  $W' \rightarrow WZ$  запрещен.

Другой моделью, рассматриваемой в данной диссертации, является заряженный киральный бозон  $W^*$ . Этот бозон образует дублет с нейтральным бозоном  $Z^*$ , поиск которого был предложен на ЛНС в работе [17]. Возможность существования таких бозонов обсуждается в работе [18]. В ней рассматривается три различных класса теорий, направленных на решение проблемы иерархии, в которых предсказывается существование дублетов векторных бозонов ( $Z^{*0}, W^{*\pm}$ ). Общей характерной чертой этих моделей является то, что они основаны на существовании калибровочной симметрии  $U(3) \equiv SU(3)_W \times U(1)_W$ , являющейся расширением электрослабой симметрии  $SU(2)_W \times U(1)_Y$ . Индексы  $W$  и  $Y$  означают квантовые числа слабого изоспина и слабого гиперзаряда соответственно. Дублеты векторных бозонов возникают как компоненты группы симметрии  $SU(3)_W$ . Калибровочная симметрия  $U(3)$  спонтанно нарушается до электрослабой калибровочной сим-

метрии при некотором энергетическом масштабе порядка ТэВ. При таком нарушении симметрии бозоны  $Z^*$  и  $W^*$  приобретают массы. Главной особенностью таких бозонов является тензорный характер их связи с фермионами, в отличие от векторного для  $W'/Z'$ -бозонов. Бозоны  $W^*$ , как и  $W'$ -бозоны могут распадаться на заряженный лептон и нейтрино, но различие в характере взаимодействия будет приводить к различию в кинематике продуктов распада этих бозонов, которое проиллюстрировано в диссертации. Такое различие может быть использовано для модельно-зависимого анализа в случае обнаружения новых тяжелых бозонов. В данной диссертации в качестве базовой модели для поиска была выбрана модель, описанная в работах [19, 20]. Эта модель построена таким образом, чтобы ширины распадов  $W^*$ - и SSM  $W'$ -бозонов были равны для рассматриваемой массы бозона.

В этой главе также сделан обзор результатов предыдущих экспериментов по поиску  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов.

Во второй главе описан ускоритель LHC и детектор ATLAS. Рассмотрены основные подсистемы детектора ATLAS, важные с точки зрения выполнения данной работы. Приведены их основные характеристики, такие как энергетическое и импульсное разрешения. Также рассмотрена работа системы считывания данных и триггера детектора ATLAS. Приведены основные параметры работы ускорителя LHC и детектора ATLAS во время накопления данных. В 2012 году ускоритель LHC работал в режиме столкновения пучков протонов с энергией в системе центра масс равной 8 ТэВ. Временной интервал между столкновениями составлял 50 нс. Соударения протонов происходили с высокой интенсивностью (до  $1,7 \times 10^{11}$  протонов в банче), что обеспечивало высокую светимость ускорителя. Максимальная пиковая светимость достигала значения  $7,73 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , а интегральная светимость для данных пригодных для проведения физических исследований составила  $20,3 \text{ фбн}^{-1}$ .

Третья глава посвящена регистрации электронов и измерению недостающей поперечной энергии детектором ATLAS. В ней приведено описание алгоритмов реконструкции и идентификации электронов, а также рассмотрен алгоритм работы триггера электронов. Описана методика измерения эффективности идентификации электронов с высокими поперечными импульсами и эффективности работы триггера для таких электронов для данных и моделированных событий. Показано, что такие эффективности для данных отличаются от эффективностей для моделированных событий. Для того что-

бы привести эффективности идентификации и триггера в моделированных событиях к эффективным в данных, были вычислены поправочные коэффициенты, зависящие от псевдобыстроты,  $\eta$ , и поперечного импульса,  $p_T$ , электрона. Такие коэффициенты определялись как отношение эффективности в данных к эффективности в моделированных событиях. Полученные поправочные коэффициенты применялись в данной работе как веса для моделированных событий.

В четвертой главе рассмотрены сигнальные и фоновые процессы. В данной работе в качестве сигнала рассматривались процессы  $pp \rightarrow W' \rightarrow e\nu$  и  $pp \rightarrow W^* \rightarrow e\nu$ . В качестве фона рассматривались процессы, в которых в конечном состоянии образуется один электрон и недостающая поперечная энергия  $E_T^{\text{miss}}$ . Основным источником фона в данной работе являлся процесс  $pp \rightarrow W \rightarrow e\nu$ . Этот фон невозможно было подавить введением каких-либо дополнительных критериев отбора. К второстепенным источникам фона относились следующие процессы. Рождение одиночных  $t$ -кварков и пар кварков  $t\bar{t}$  с дальнейшим распадом  $t$ - (или  $\bar{t}$ -) кварка на  $W$ -бозон и  $b$ -кварк. Такой процесс давал вклад в фон в случае, если  $W$ -бозон затем распадался на электрон и нейтрино. Рождение пар бозонов  $WW$ ,  $WZ$  и  $ZZ$ . В этом случае вклад в фон давали распады бозонов  $W \rightarrow e\nu$ ,  $Z \rightarrow ee$  и  $Z \rightarrow \nu\nu$ . Рождение  $Z$ -бозонов. В этом случае вклад в фон давал процесс  $Z \rightarrow ee$ , если по какой-либо причине один из электронов не был реконструирован. Рождение  $W$ - и  $Z$ -бозонов, а также пар бозонов, с дальнейшим распадом бозонов  $W \rightarrow \tau\nu$  и  $Z \rightarrow \tau\tau$ . Такие процессы давали дополнительный вклад в фон в случае распада  $\tau$ -лептона на электрон и два нейтрино:  $e\nu_e\nu_\tau$ . Вклад в фон давали также двухструйные процессы, в случае если одна из струй была реконструирована как электрон.

Все сигнальные и фоновые процессы моделировались методом Монте-Карло, за исключением фона от адронных струй, который оценивался из данных. В этой главе описаны особенности моделирования сигнальных и фоновых процессов методом Монте-Карло. Приведены сечения этих процессов. В данной работе для уточнения сечений, полученных при генерировании, вводились так называемые  $K$ -факторы. Они определялись как отношение сечений, рассчитанных при более высоких порядках теории возмущения, к сечениям, полученным при генерировании. Для процессов  $pp \rightarrow W' \rightarrow e\nu$  и  $pp \rightarrow W \rightarrow e\nu$  были определены  $K$ -факторы, зависящие от инвариантной массы пары электрон-нейтрино, которые применялись как веса для модели-

рованных событий. В данной главе описано вычисление таких  $K$ -факторов.

В **пятой главе** обсуждается анализ данных и моделированных событий, приведены критерии их отбора. Отбор событий производился на основе набора критериев, выбранного и оптимизированного таким образом, чтобы как можно сильнее подавить фон, сохранив при этом достаточно высокую эффективность отбора сигнала. В данной главе рассмотрены поправки, которые применялись для моделированных событий для более точного описания экспериментальных данных. К таким поправкам относятся: поправки на наложение событий, поправки для энергетического разрешения калориметра, поправки для эффективностей идентификации электронов и работы триггера, поправки более высоких порядков к сечениям процессов. Также рассмотрена поправка энергетической калибровки в данных. Описана процедура оценки фона от двухструйных процессов с использованием данных. В этой главе сделано сравнение измеренных кинематических распределений с кинематическими распределениями, полученными в результате выполненных оценок фона. Такое сравнение было выполнено для всех основных кинематических распределений, таких как распределение по поперечной массе  $m_T$ , распределения по  $p_T$ ,  $\eta$  и  $\varphi$  электрона, распределение по недостающей энергии  $E_T^{\text{miss}}$  в событии. На рисунке 1 показано распределение отобранных событий в зависимости от  $m_T$ . Из рисунка видно, что имеет место хорошее согласие данных с предсказаниями СМ. На основании этого сделан вывод, что статистически значимого превышения данных над предсказаниями СМ, которое могло бы свидетельствовать в пользу существования новых частиц, не наблюдается.

**Шестая глава** посвящена статистическому анализу экспериментальных данных. Приведено описание байесовского анализа и объяснена его численная реализация. Перечислены источники и приведены значения систематических ошибок, которые учитывались в данной работе. К источниками систематических ошибок относились: ошибки шкалы энергии и энергетического разрешения, ошибки поправок эффективности идентификации электронов и работы триггера, ошибки поправок более высоких порядков к сечениям процессов, отклонение энергии пучков протонов от номинального значения, ошибки сечения рождения одиночных  $t$ -кварков и пар кварков  $t\bar{t}$ , ошибки энергетической шкалы и разрешения недостающей поперечной энергии, ошибки оценки фона от адронных струй, ошибки определения интегральной светимости накопленных данных.

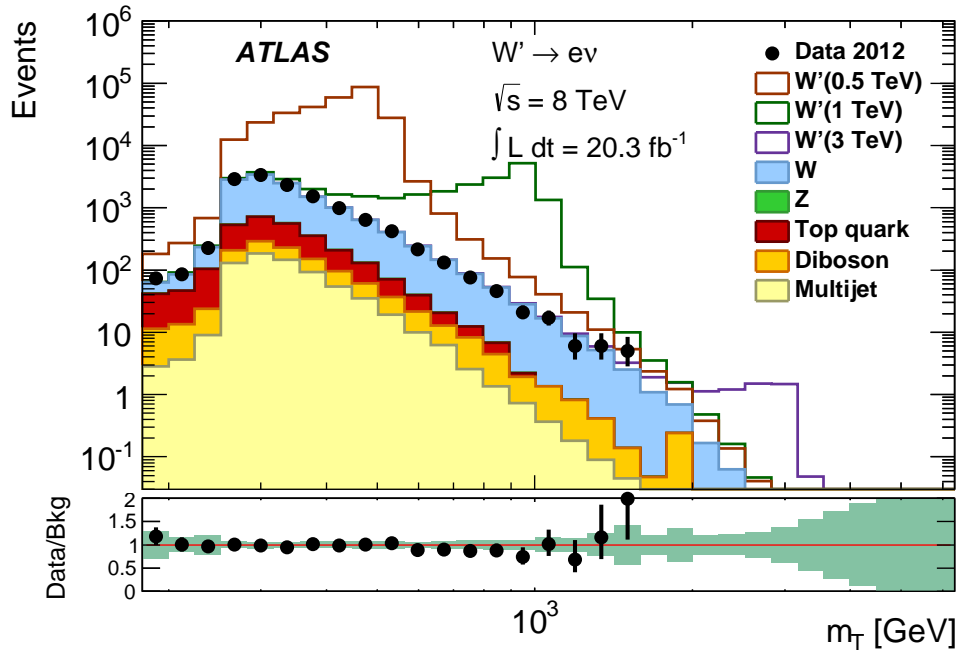


Рисунок 1 — Распределения отобранных событий в зависимости от  $m_T$ . Показаны события для данных (точки), фоновые события (заштрихованные гистограммы) и ожидаемые сигнальные события  $W' \rightarrow e\nu$  (незаштрихованные гистограммы) для масс  $W'$  бозонов равных 0,5, 1 и 3 ТэВ. Для данных показаны статистические ошибки числа событий. Под каждым рисунком показано отношение числа событий в данных к числу фоновых событий (точки) и ошибки числа фоновых событий (заштрихованная область), включающая статистическую и систематическую составляющие

В этой главе рассмотрен выбор оптимальных порогов по поперечной массе необходимых для проведения статистического анализа. Он проводился для каждой рассматриваемой в данной работе массы тяжелых векторных бозонов, и отдельно для моделей  $W'$  и  $W^*$ . Оптимальным считался такой порог, при котором ожидаемые верхние пределы на сечение  $\sigma B$  для конкретной массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов были минимальны. Такое требование минимальности приводило к наиболее «сильному» исключению существования тяжелых векторных бозонов при отсутствии сигнала от них. В этой главе также приведены исходные данные для процедуры вычисления пределов. Такие данные были получены с учетом всех перечисленных систематических ошибок.

В **седьмой главе** приведены основные результаты, полученные в данной работе: значения верхних пределов на сечения рождения,  $\sigma B$ , и нижних пределов на массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов. Такие пределы были получены в рамках байесовского анализа, описанного в шестой главе. Эти результаты были объединены с результатами исследования по поиску  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов в

канале их распада на мюон и нейтрино, описание которого выходит за рамки данной диссертации. На рисунке 2 показаны наблюдаемые и ожидаемые верхние пределы на сечение  $\sigma B$  процессов  $pp \rightarrow W'/W^* \rightarrow \ell\nu$ , полученные для такого объединения. Нижние наблюдаемые (ожидаемые) пределы на массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов на уровне достоверности 95% определялись из пересечения кривых наблюдаемых (ожидаемых) пределов с кривыми теоретических сечений рождения таких бозонов. Значения наблюдаемых пределов для канала распада  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов на электрон и нейтрино равны 3,13 и 3,08 ТэВ соответственно, а для объединения двух каналов распада — 3,24 и 3,21 ТэВ соответственно. Таким образом было исключено существование  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов с массами ниже этих значений.

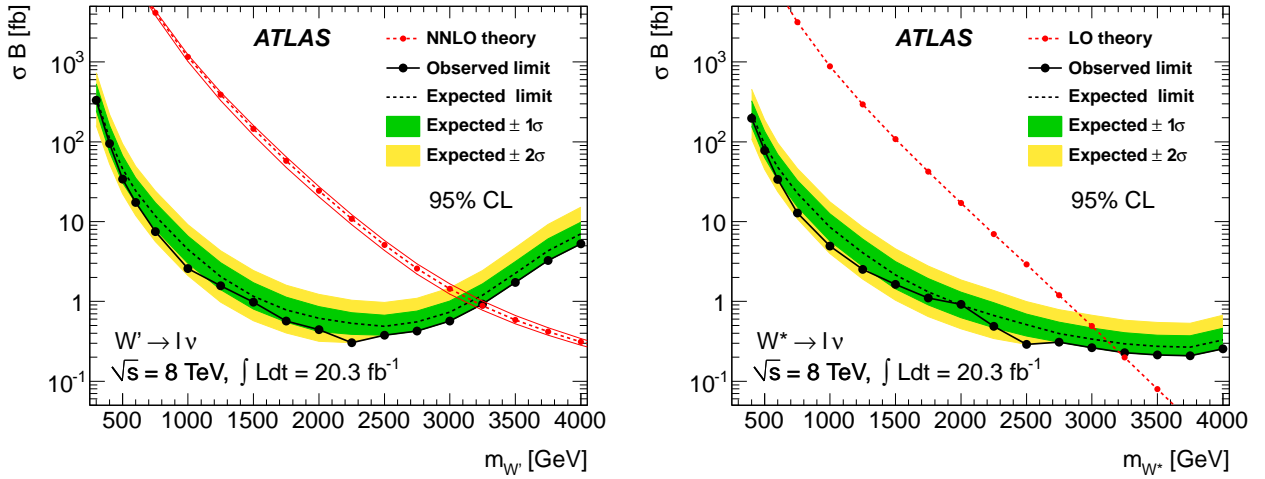


Рисунок 2 — Верхние наблюдаемые (черные точки) и ожидаемые (пунктирная кривая) пределы на сечения рождения  $W'$ - (слева) и  $W^*$ -бозонов (справа), установленные с уровнем достоверности 95% для объединения канала их распада на электрон и нейтрино, с каналом распада на мюон и нейтрино. Для ожидаемых пределов показаны отклонения на одно и два стандартных отклонения от центральных значений (зеленая и желтая области соответственно). Также показаны теоретические сечения рождения  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов (красные кривые)

В этой главе также приведено сравнение полученных результатов с результатами предыдущих экспериментов по поиску таких бозонов и предыдущими результатами эксперимента ATLAS. В таблице 1 приведены величины нижних наблюдаемых пределов на массы  $W'$ -бозонов, полученные в экспериментах CDF [21] и DØ [22], и в разные годы в экспериментах ATLAS [2, 3, 7] и CMS [23, 24, 25], а также величины нижних пределов на массы  $W^*$ -бозонов, полученные в эксперименте ATLAS. Результаты диссертации приведены в

столбце «ATLAS 2012». Из таблицы видно, что полученный предел на массу  $W'$ -бозона сравним с результатом эксперимента CMS для данных 2012 года. Предел на массу  $W^*$ -бозона является наилучшим из существующих в мире на данный момент.

Таблица 1 — Нижние наблюдаемые пределы на массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов в ТэВ, установленные с уровнем достоверности 95%, полученные в различных экспериментах

Модель	D $\emptyset$	CDF	CMS			ATLAS		
			2010	2011	2012	2010	2011	2012
$W'$	1,0	1,12	1,58	2,50	3,28	1,49	2,55	3,24
$W^*$	-	-	-	-	-	1,35	2,42	3,21

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты, представленные в диссертации:

1. Выбраны оптимальные с точки зрения поиска  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов критерии отбора событий в данных, полученных в эксперименте ATLAS в 2012 году, и событий, моделированных методом Монте-Карло. С учетом выбранных критериев создано ПО для отбора событий.
2. При помощи созданного ПО проанализированы данные, накопленные в эксперименте ATLAS в 2012 году, соответствующие интегральной светимости 20,3 фбн<sup>-1</sup>. Также при помощи этого ПО отобраны моделированные сигнальные события ( $pp \rightarrow W' \rightarrow e\nu$  и  $pp \rightarrow W^* \rightarrow e\nu$ ) и события, отвечающие основным фоновым процессам, предсказываемым в рамках СМ. Определены эффективности отбора сигнальных событий в зависимости от массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов в диапазоне масс 300 — 4000 ГэВ.
3. Для моделированных событий учтены все необходимые поправки. К таким поправкам относятся: поправки, связанные с наложением событий



при столкновении пучков протонов, поправки для энергетического разрешения электромагнитного калориметра, поправки для эффективности идентификации электронов и работы триггера, поправки более высоких порядков к сечениям сигнальных и фоновых процессов. Для данных учтена поправка калибровки энергии электронов.

4. Для моделированных событий произведена оценка систематических ошибок, связанных со шкалой энергии электронов, энергетическим разрешением электромагнитного калориметра, эффективностями идентификации электронов и работы триггера, поправками более высоких порядков к сечениям процессов  $pp \rightarrow W \rightarrow \ell\nu$ ,  $pp \rightarrow Z \rightarrow \ell\ell$  и  $pp \rightarrow W' \rightarrow \ell\nu$ , энергией пучков протонов, сечениями рождения одиночных  $t$ -кварков и пар кварков  $t\bar{t}$ , недостающей поперечной энергией и оценкой КХД фона.
5. Произведено сравнение основных кинематических распределений для данных и моделированных событий с учетом всех систематических ошибок. Такое сравнение не выявило статистически значимых отклонений отобранных данных от предсказаний СМ. Таким образом на основе накопленных в 2012 году данных существование  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов не подтверждено.
6. Определены верхние пределы на сечения рождения  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов на уровне достоверности 95% в диапазоне их масс 300 – 4000 ГэВ. Также определены нижние пределы на уровне достоверности 95% на массы таких бозонов, которые составили 3,13 и 3,08 ТэВ для  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов соответственно.

Результаты данного исследования объединены с результатами исследования по поиску  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов в канале их распада на мюон и нейтрино. Определены верхние пределы на сечения и нижние пределы на массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов для такого объединения. Нижние пределы на массы на уровне достоверности 95% для этого случая составили 3,24 и 3,21 ТэВ для  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов соответственно. Таким образом на основе экспериментальных данных исключено существование  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов с массами ниже этих значений. Пределы для  $W'$ -бозона сравнимы с пределами, полученными в эксперименте CMS на основе данных 2012 года. Пределы для  $W^*$ -бозона являются наилучшими на данный момент в мире.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Начиная с 2015 года на ускорителе LHC была увеличена энергия сталкивающихся пучков протонов в системе центра масс до 13 ТэВ. Увеличение энергии даст возможность продвинуться в область еще больших поперечных масс для состояния с одним электроном и недостающей поперечной энергией. Это в свою очередь позволит либо сделать открытие новых бозонов, либо установить еще более сильные ограничения на их существование. Результаты данного исследования и накопленный в ходе его выполнения опыт используются при исследовании новых данных 2015 и 2016 годов, и могут быть использованы в будущем.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

1. Aad, G. Search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino in  $1 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  using the ATLAS detector / G. Aad, ..., **V. Solovyev** [et al.] (ATLAS Collaboration) // Phys. Lett. B. – 2011. – Vol. 705, no. 1–2. – P. 28–46.
2. Aad, G. ATLAS search for a heavy gauge boson decaying to a charged lepton and a neutrino in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  / G. Aad, ..., **V. Solovyev** [et al.] (ATLAS Collaboration) // Eur. Phys. J. C. – 2012. – Vol. 72, no. 12. – P. 2241.
3. Aad, G. Search for new particles in events with one lepton and missing transverse momentum in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector / G. Aad, ..., **V. Solovyev** [et al.] (ATLAS Collaboration) // JHEP. – 2014. – Vol. 09. – P. 037.
4. Solovyev, V. Searches for physics beyond the Standard Model with the ATLAS detector / V. Solovyev // New Trends in High-Energy Physics : Proceedings of the Conference. – 2013. – P. 117–121.
5. Solovyev, V. Searches for Exotics with the ATLAS detector / V. Solovyev – Gevena: CERN. – ATL-PHYS-PROC-2014-076. – 2014. – 5 p.
6. Solovyev, V. Search for heavy charged vector bosons decaying to a charged lepton and a neutrino with the ATLAS experiment / V. Solovyev – Gevena: CERN. – ATL-PHYS-PROC-2015-161. – 2015. – 5 p.

## Список литературы

7. Aad, G. Search for high-mass states with one lepton plus missing transverse momentum in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector / G. Aad [et al.] (ATLAS Collaboration) // Phys. Lett. B. – 2011. – Vol. 701, no. 1. – P. 50–69.
8. Langacker, P. New heavy gauge bosons in  $pp$  and  $p\bar{p}$  collisions / P. Langacker, R. W. Robinett, J. L. Rosner // Phys. Rev. D. – 1984. – Vol. 30, no. 7. – P. 1470–1487.
9. London, D. Extra gauge bosons in  $E_6$  / D. London, J. L. Rosner // Phys. Rev. D. – 1986. – Vol. 34, no. 5. – P. 1530–1546.
10. Buccella, F. SO(10) unified theories and cosmology / F. Buccella [et al.] // Phys. Atom. Nucl. – 1998. – Vol. 61. – P. 983–990.
11. Schmaltz, M. Little Higgs review / M. Schmaltz, D. Tucker-Smith // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. – 2005. – Vol. 55. – P. 229–270.
12. Perelstein, M. Little Higgs models and their phenomenology / M. Perelstein // Prog. Part. Nucl. Phys. – 2007. – Vol. 58, no. 1. – P. 247–291.
13. Antoniadis, I. Production of Kaluza-Klein states at future colliders / I. Antoniadis, K. Benakli, M. Quiros // Phys. Lett. B. – 1994. – Vol. 331, no. 3. – P. 313–320.
14. Azuelos, G. Exploring little Higgs models with ATLAS at the LHC / G. Azuelo [et al.] // Eur. Phys. J. C. – 2005. – Vol. 39, no. 2. – P. 13–24.
15. Polesello, G. Prospects for observing the Kaluza-Klein excitations of the W boson in the ATLAS detector at the LHC / G. Polesello, M. Prata // Eur. Phys. J. C. – 2003. – Vol. 32, no. 2. – P. 55–67.
16. Altarelli, G. Searching for new heavy vector bosons in  $p\bar{p}$  colliders / G. Altarelli, B. Mele, M. Ruiz-Altaba // Z. Phys. C. – 1989. – Vol. 45, no. 1. – P. 109–121.
17. Chizhov, M. V. Proposal for chiral bosons search at LHC via their unique new signature / M. V. Chizhov, V. A. Bednyakov, J. A. Budagov // Phys. Atom. Nucl. – 2008. – Vol. 71, no.12. – P. 2096–2100.

18. Chizhov, M. V. Origin and Phenomenology of Weak-Doublet Spin-1 Bosons / M. V. Chizhov, G. Dvali // Phys Lett. B. – 2011. – Vol. 703. – P. 593–598.
19. Chizhov, M. V. Anomalously interacting extra neutral bosons / M. V. Chizhov, V. A. Bednyakov, J. A. Budagov // Nuovo Cimento C. – 2010. – Vol. 33, no. 5. – P. 343–350.
20. Chizhov, M. V. A reference model for anomalously interacting bosons / M. V. Chizhov // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2011. – Vol. 8, no. 6. – P. 512–516.
21. Aaltonen, T. Search for a new heavy gauge boson  $W'$  with event signature electron + missing transverse energy in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV / T. Aaltonen [et al.] (CDF Collaboration) // Phys. Rev. D. – 2011. – Vol. 83. – P. 031102.
22. Abazov, V. M. Search for  $W'$  bosons decaying to an electron and a neutrino with the D0 detector / V. M. Abazov [et al.] (D0 Collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 100. – P. 031804.
23. Chatrchyan, S. Search for a  $W'$  boson decaying to a muon and a neutrino in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV / S. Chatrchyan [et al.] (CMS Collaboration) // Phys. Lett. B. – 2011. – Vol. 701, no. 2. – P. 160–179.
24. Chatrchyan, S. Search for leptonic decays of  $W'$  in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV / S. Chatrchyan [et al.] (CMS Collaboration) // JHEP. – 2012. – Vol. 08. – P. 023.
25. Khachatryan, V. Search for physics beyond the standard model in final states with a lepton and missing transverse energy in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV / V. Khachatryan [et al.] (CMS Collaboration) // Phys. Rev. D. – 2015. – Vol. 91, no. 9. – P. 092005.