

Объединенный институт ядерных исследований  
Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Дзелепова

На правах рукописи

УДК 539.126, 539.128

Елецких Иван Владимирович

**Поиск нового бозона  $Z^*$  в данных протон-протонных  
столкновений детектора ATLAS в канале с двумя мюонами в  
конечном состоянии**

Специальность: 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2014

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
директор ЛЯП ОИЯИ

Бедняков Вадим Александрович;

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры физики

ГГТУ им. П.О. Сухого

Панков Александр Альбертович

доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры экспериментальной

ядерной физики и космофизики НИЯУ МИФИ

Петрухин Анатолий Афанасьевич

Ведущая организация: Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

Защита состоится 24 декабря 2014 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 при ОИЯИ по адресу: 141980, Дубна, ОИЯИ, Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Дзелепова, корп.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ и на сайте:

[http://wwwinfo.jinr.ru/dissertation/DC\\_dlnp.htm](http://wwwinfo.jinr.ru/dissertation/DC_dlnp.htm)

Автореферат разослан ”\_\_” \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Г.А. Карамышева

# 1 Общая характеристика работы

## Актуальность темы.

Одной из актуальных на данный момент теоретических проблем Стандартной модели является "проблема иерархии". Эта проблема заключается в необходимости чрезвычайно точного определения некоторых констант для обеспечения согласованности теории. В частности, одним из параметров Стандартной модели, требующим такой "тонкой настройки", является масса бозона Хиггса, радиационные поправки к которой квадратично расходятся с ростом масштаба ультрафиолетового обрезания теории.

Существует несколько теоретических сценариев, в которых указанная проблема решается естественным путем. Среди подобных теорий стоит упомянуть суперсимметричные расширения Стандартной модели, модели так называемого "малого Хиггса", в которых постулируется расширение группы симметрии электрослабого сектора Стандартной модели, модели, привлекающие новые типы взаимодействий, например, модели техницвета, модели с дополнительными пространственными измерениями. Все эти классы теорий предсказывают иерархию новых частиц.

В моделях с расширенной группой симметрии спектр новых частиц включает новые фермионы, скаляры и калибровочные бозоны. Если нарушение новой симметрии происходит на масштабах энергий порядка нескольких ТэВ, то новые частицы имеют массы этого же порядка величины. Другой класс моделей, где постулируется составной характер бозона Хиггса и дается его описание как псевдо-Нambu-Голдстоуновского бозона (аналог пиона в КХД), также предсказывает существование спектра частиц с массами порядка одного или нескольких ТэВ.

Одна из моделей новых частиц носит название  $Z^*$  и предполагает особый "тензорный" тип связи с частицами Стандартной модели. Значительный рост интереса к моделям, проявляющимся на масштабах энергий в несколько ТэВ, в последнее время связан с тем, что предсказываемые в теории значения масс и сечений новых частиц свидетельствуют о возможности их обнаружения в протон-протонных столкновениях на ЛНС. В частности – новые резонансы  $Z^*$  могут быть обнаружены в спектре дилептонных конечных

состояний.

Экспериментальное подтверждение или опровержение существования тяжелых нейтральных резонансов с массами порядка нескольких ТэВ имеет особую актуальность для физики высоких энергий, в частности, для понимания природы электрослабых взаимодействий при высоких энергиях, решения проблемы согласованности параметров Стандартной модели, разработки новых теоретических сценариев вне Стандартной модели.

Необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в сфере очерченных проблем и предлагаемых в литературе теоретических сценариев их решения обуславливает выбор темы диссертационной работы, её цель и задачи.

### **Цель и задачи диссертационной работы.**

Целью диссертационной работы является исследование теоретических предпосылок существования и экспериментальное обнаружение резонанса, связанного с рождением нового тяжелого бозона  $Z^*$ , в данных установки ATLAS в спектре инвариантных масс состояний с двумя противоположно заряженными мюонами. В соответствии с целью исследования, поставлены и решены следующие задачи:

- Исследованы возможные теоретические сценарии вне Стандартной модели, в которых присутствуют новые тяжелые бозоны  $Z^*$ ;
- Определены свойства резонансных событий  $Z^*$ , наблюдение которых возможно детектором ATLAS в протон-протонных столкновениях;
- Смоделирована необходимая для анализа статистика событий сигнального процесса  $pp \rightarrow Z^* \rightarrow \mu^+ \mu^-$  для всевозможных масс  $Z^*$ , получены данные об эффективности отбора событий рождения  $Z^*$  в димюонном канале в зависимости от инвариантной массы мюонов;
- Исследованы свойства основных фоновых процессов Стандартной модели, произведена обработка смоделированных событий, исследовано качество моделирования фоновых процессов;

- Создано программное обеспечение отбора и анализа данных установки ATLAS для канала с двумя мюонами в конечном состоянии. Оптимизированы критерии отбора событий с целью достижения наилучшего качества и обеспечения высокой эффективности реконструкции мюонов, а также подавления фоновых процессов;
- Определены источники и вычислены значения систематических погрешностей моделирования процессов Стандартной модели в зависимости от инвариантной массы мюонов;
- Обработаны экспериментальные данные протон-протонных столкновений, набранные установкой ATLAS в 2011, 2012 гг., в объеме  $\approx 25\text{fb}^{-1}$ ;
- Для основных кинематических переменных, характеризующих события с двумя мюонами, проведен сравнительный анализ данных установки ATLAS с предсказанием Стандартной модели;
- Произведены вычисления статистической совместимости наблюдений с гипотезами существования резонансов  $Z^*$  всевозможных масс;
- Произведена оценка потенциальных возможностей обнаружения новых тяжелых резонансов в будущем.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Предложение поиска новых тяжелых нейтральных бозонов  $Z^*$  на экспериментальной установке ATLAS, кинематические свойства событий с рождением  $Z^*$  в протон-протонных столкновениях с распадом в лептонном канале;
2. Оптимизация методов восстановления мюонов в данных протон-протонных столкновений экспериментальной установки ATLAS и алгоритмов отбора событий с мюоном и анти-мюоном в конечном состоянии применительно к поиску тяжелых резонансов;
3. Результаты Монте-Карло моделирования процессов рождения мюонных пар в рамках Стандартной модели и резонансного рождения бозона  $Z^*$  с целью оценки сигнала и фона, вычисление систематических неопределенностей моделирования фоновых процессов;

4. Сравнительный анализ наблюдаемых экспериментальных данных в димюонном канале с предсказаниями Стандартной модели для различных кинематических переменных, исследования статистической совместимости наблюдаемого и моделированного распределений инвариантной массы пары мюонов с гипотезами сигнала  $Z^*$  различных масс и сечений;
5. Оценка порогов обнаружения резонанса типа  $Z^*$  при номинальной энергии (14 ТэВ) и светимости коллайдера LHC.

### **Научная новизна.**

- На основе изучения теоретических предпосылок существования новых нейтральных резонансов и исследования их ожидаемых наблюдаемых свойств – впервые предлагается поиск нового резонанса  $Z^*$  спина 1 в данных протон-протонных столкновений высоких энергий в канале с двумя мюонами в конечном состоянии;
- Впервые смоделировано рождение новых бозонов  $Z^*$  в протон-протонных столкновениях, исследованы свойства лептонов в распадах  $Z^*$ , предлагаются критерии идентификации резонансных событий  $Z^*$ , что позволяет осуществить задачу экспериментального поиска нового резонанса в данных протон-протонных столкновений установки ATLAS;
- Критерии реконструкции мюонов и отбора событий с двумя мюонами оптимизированы для задачи поиска тяжелых резонансов с точки зрения качества реконструкции, подавления фоновых процессов и высокой эффективности отбора событий  $Z^*$ , что обеспечивает высокую чувствительность поиска к обнаружению новых резонансов;
- Определены источники и вычислены величины систематических неопределенностей моделирования процессов Стандартной модели в протон-протонных столкновениях энергий 7, 8 ТэВ в зависимости от инвариантной массы мюонов в конечном состоянии. Это позволяет правильно оценить значимость потенциального сигнала или, в случае его отсутствия, произвести корректные вычисления ограничений на сечения и массу  $Z^*$ ;
- Получены наилучшие на данный момент ограничения на возможные се-

чения и массу тяжелых бозонов  $Z^*$ .

### **Значимость полученных результатов.**

Значимость полученных результатов для теории такова:

- Исследование согласия данных с предсказаниями Стандартной модели крайне важно с точки зрения понимания свойств электрослабых взаимодействий при высоких энергиях;
- В отсутствие наблюдения сигналов новых тяжелых резонансов – новые ограничения на параметры модели  $Z^*$  могут послужить основанием для пересмотра теоретических взглядов на проблему иерархии, а также для предложений новых теоретических сценариев, объясняющих иерархию масс частиц Стандартной модели.

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

- Разработанное автором программное обеспечение обработки данных будет использовано в дальнейшем для анализа димьюонных событий в данных детектора ATLAS;
- При участии автора создано программное обеспечение он-лайн мониторинга состояния экспериментальной установки, использование которого планируется в следующих циклах обработки данных;
- Определены оптимальные для поиска тяжелых нейтральных резонансов критерии отбора димьюонных событий, а также критерии идентификации резонансов типа  $Z^*$ ;
- Накоплен опыт обработки событий, смоделированных Монте-Карло генераторами: определены основные источники неточностей и систематических погрешностей моделирования, отработаны корректные процедуры улучшения качества моделирования в соответствии с параметрами наблюдаемых данных;
- Отработаны процедуры статистического анализа данных.

## **Апробация работы.**

Результаты, представленные в диссертации, докладывались автором на научных семинарах ЛЯП ОИЯИ; на совещаниях коллаборации ATLAS; на совещаниях российских институтов, участвующих в коллаборации ATLAS (28 января 2013, НИИЯФ МГУ, Москва; 23-25 сентября 2013 г., ОИЯИ, Дубна; 22-23 сентября 2014 г., ОИЯИ, Дубна); на международных конференциях "SPIN-2012" (17-22 сентября 2012 г., ОИЯИ, Дубна), "Физика фундаментальных взаимодействий" (12-16 ноября 2012, НИЯУ МИФИ, Москва), на международном семинаре по физике высоких энергий "Кварки-2014" (2-8 июня 2014, Суздаль, Россия); на международных школах: "2011 European School on High Energy Physics" (7-20 сентября 2011, Моечу, Румыния), "International School of Subnuclear Physics" (23 June – 2 July 2012, Эриче, Италия);

## **Личный вклад.**

Личный вклад автора в проведение исследований и получение представленных в работе результатов является определяющим. Все представленные результаты получены либо самим автором, либо при его участии.

## **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из 4-х глав, изложена на 159 страницах, содержит 59 рисунков, 20 таблиц и список цитируемой литературы из 119 наименований.

## **2 Содержание работы**

**Во введении** обоснована цель исследований, описанных в работе, их актуальность, кратко описываются стратегии анализа данных и поиска  $Z^*$ .

**В первой главе** ("Исследование теоретических предсказаний новых дилептонных резонансов и наблюдаемых свойств нового бозона  $Z^*$ ") исследованы теоретические предпосылки существования тяжелого нейтрального бозона  $Z^*$ , а также предсказываемые теорией наблюдаемые свойства нового резонанса.



Основное внимание в этой главе уделено теоретическим сценариям вне Стандартной модели, которые направлены на преодоление проблемы иерархии. Суть этой проблемы заключается в необходимости объяснения большой разницы масштабов фундаментальных взаимодействий, масс элементарных частиц и согласованности этих параметров с теоретическими расчетами. В частности, одним из проявлений этой проблемы является проблема тонкой настройки массы бозона Хиггса, связанная с необходимостью чрезвычайно точного задания начальных параметров теории для обеспечения наблюдаемого экспериментально значения  $M_H$ .

Существует несколько классов теорий за рамками Стандартной модели, в которых проблема иерархии не возникает. Одним из таких расширений являются суперсимметричные теории. Другими примерами таких теорий могут быть модели "малого Хиггса", модели техницвета, составного бозона Хиггса и т.д. Ингредиентами упомянутых теорий являются новые тяжелые фермионы, калибровочные бозоны и скалярные частицы с массами порядка одного или нескольких ТэВ. Одним из типов новых частиц, появляющихся в описанных теоретических сценариях, является тяжелый нейтральный векторный бозон  $Z^*$ . Взаимодействие  $Z^*$  с фермионами Стандартной модели описывается особенной – "тензорной" связью следующего вида:

$$L \sim \bar{\psi}_2 \sigma^{\mu\nu} (1 + \gamma^5) \psi_1 (\partial_\mu Z_\nu^* - \partial_\nu Z_\mu^*), \quad (1)$$

где  $Z_\mu^*$  – векторное поле новых калибровочных бозонов,  $\psi$  – поля фермионов Стандартной модели. Свойства оператора взаимодействия (1) отражаются в специфических наблюдаемых свойствах новых бозонов, в частности – события дилептонных распадов резонансов типа  $Z^*$  характеризуются уникальными кинематическими распределениями частиц в конечном состоянии (Рисунок 1).

Одной из кинематических переменных, удобной для изучения угловых распределений лептонов в дилептонных событиях распадов новых резонансов, которые могут наблюдаться в столкновениях на коллайдере, является разность псевдобыстрот лептонов в конечном состоянии. Значение этой переменной является инвариантным относительно преобразований Лоренца вдоль

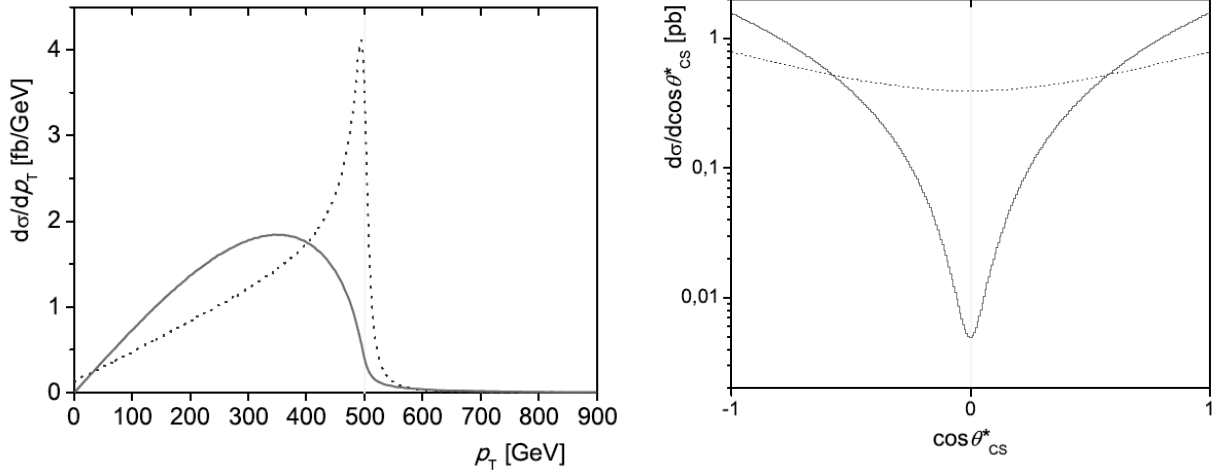


Рис. 1: Распределения лептонов распада по поперечному импульсу для бозонов  $Z'$  (пунктирная кривая) и  $Z^*$  (сплошная кривая) массой 1 ТэВ (слева). Распределение косинуса угла между лептонами распада в системе отсчета Коллинза-Сопера для бозонов  $Z'$  (пунктирная кривая) и  $Z^*$  (сплошная кривая) массой 1ТэВ (справа) [1].

оси сталкивающихся пучков. Распределения этой переменной в распадах различных типов нейтральных бозонов (массой 1 ТэВ), полученные путем теоретических вычислений, показаны на Рисунке 2. Резонанс типа  $Z^*$  характеризуется уникальным распределением по разности псевдобыстрот лептонов — в отличие от других типов резонансов, для  $Z^*$  это распределение имеет максимум при  $\Delta\eta \approx 1.8$ .

Показано, что эти свойства позволят, в случае обнаружения событий нового резонанса, с высокой достоверностью идентифицировать их с моделью бозона  $Z^*$ .

**Во второй главе** ("Экспериментальная установка и обработка экспериментальных данных") описывается устройство Большого адронного коллайдера (ЛHC), параметры пучков ускоряемых частиц, устройство и характеристики экспериментальной установки ATLAS. С точки зрения направленности исследования наибольшее внимание уделяется устройству "внутреннего детектора" и "мюонного спектрометра" установки ATLAS, поскольку в этих подсистемах осуществляются основные измерения, связанные с реконструкцией мюонов.

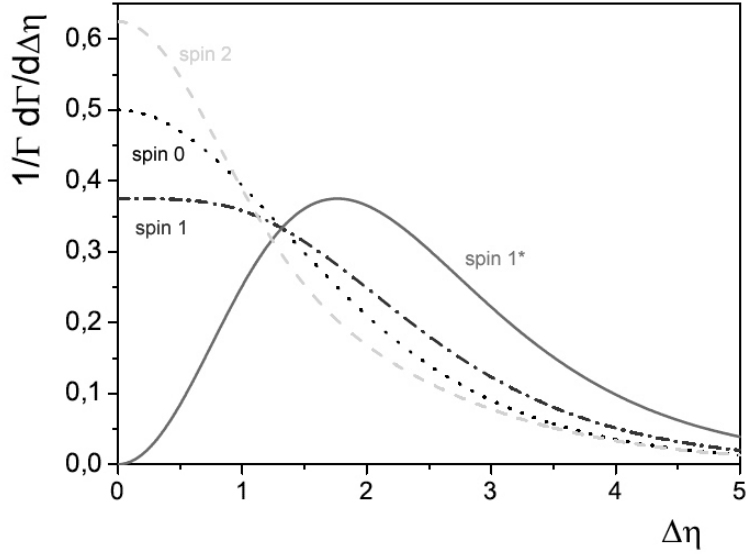


Рис. 2: Распределение разности псевдобыстрот между лептонами распада для различных типов нейтральных бозонов массой 1 ТэВ. Штрих-пунктирной линии соответствуют бозоны спина 1 типа  $Z$ ,  $Z'$  (spin 1), пунктирная линия соответствует резонансам спина 0 (spin 0), штрихованная линия — резонансам спина 2 (например,  $G^*$ ) (spin 2), сплошная линия показывает разность псевдобыстрот лептонов в распадах  $Z^*$  (spin 1\*).

Исследованы алгоритмы реконструкции мюонов, определяются оптимальные критерии отбора димюонных событий в задаче поиска тяжелых нейтральных резонансов, приводятся данные о качестве реконструкции – разрешении детектора по отношению к импульсам мюонов для различных стратегий реконструкции и в различных геометрических областях детектора.

Исследования эффективности восстановления мюонов и отбора димюонных событий, связанных с распадом резонанса  $Z^*$  показывают, что она составляет 45–46% для масс  $Z^*$  в диапазоне 0.7–2 ТэВ, и незначительно снижается при больших массах из-за снижения эффективности восстановления энергичных мюонов (см. Рисунок 3).

**В третьей главе** (”Моделирование сигнальных и фоновых событий с помощью методов Монте-Карло”) исследованы подходы к моделированию димюонных событий, связанных с основными фоновыми процессами Стандартной модели, а также с сигнальным процессом рождения  $Z^*$  с распадом в два мюона.

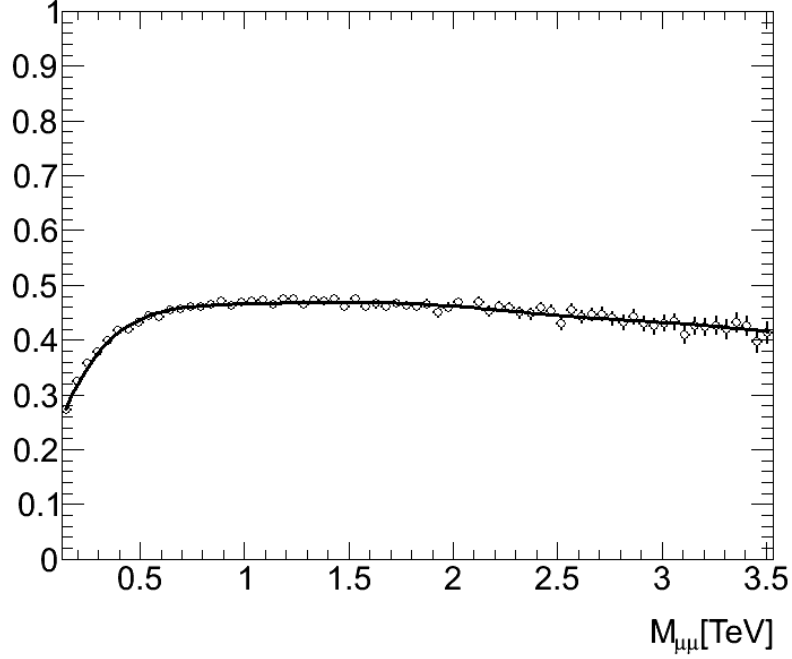


Рис. 3: Эффективность отбора димюонных событий с рождением бозона  $Z^*$  в зависимости от инвариантной массы мюонов, полученная Монте-Карло моделированием событий  $Z^*$ .

Изучено качество моделирования фоновых и сигнального процессов, разработаны методы улучшения качества моделирования с учетом свойств наблюдаемых данных.

Выявлены основные источники систематических погрешностей распределений фоновых процессов, вычислены величины этих погрешностей в зависимости от инвариантной массы мюонов (Таблица 1).

**В четвертой главе** ("Результаты статистического анализа данных") приводятся результаты сравнения распределений димюонных событий, зарегистрированных в детекторе и смоделированных методами Монте-Карло, по различным кинематическим переменным. Основными неподавляемыми фоновыми процессами Стандартной модели в рассматриваемом анализе являются процессы Дрелл-Яна, процессы с рождением пар бозонов  $Z, W$ , а также процессы с рождением одного или пары топ-кварков. Показано, что события, связанные с другими процессами Стандартной модели, такими как рождение пар  $b$ - или  $c$ -кварков или ассоциированное рождение  $W$ -бозонов со струями, эффективно подавляются критериями отбора событий и не вносят существен-

Таблица 1: Значения относительной систематической погрешности оценки распределения фоновых событий по инвариантной массе мюонов для реконструированных инвариантных масс 1 ТэВ, 2 ТэВ и 3ТэВ в протон-протонных столкновениях с энергией 8 ТэВ. Прочерками обозначены вклады в систематическую погрешность, которые принимаются пренебрежимо малыми.

Источник	Величина погрешности		
	1 ТэВ	2 ТэВ	3 ТэВ
Параметры партонной функции	5%	12%	17%
Выбор партонной функции	–	6%	12%
$\alpha_S$	1%	3%	4%
Поправки к электрослабым процессам	–	3%	3%
Процессы с фотонами в начальном состоянии	2%	3%	4%
Энергия пучка	2%	3%	3%
Разрешение детектора по импульсу мюонов	3%	3%	8%
Всего	7%	15%	23%

ного вклада в фоновые распределения.

Основной кинематической переменной, в спектре которой осуществляется поиск новых резонансов, является инвариантная масса пары мюонов. На Рисунках 4, 5 показано сравнение распределений по инвариантной массе пары мюонов в отобранных данных ATLAS 2011, 2012 гг. с моделированиями фоновых процессов Стандартной модели.

Проведенный анализ распределений димюонных событий в данных 2011 и 2012 годов по всевозможным кинематическим параметрам свидетельствует о хорошем (в пределах погрешностей) описании наблюдаемых данных моделированием процессов Стандартной модели. В Таблицах 2, 3 приведено сравнение количества событий данных и фона в различных диапазонах ин-

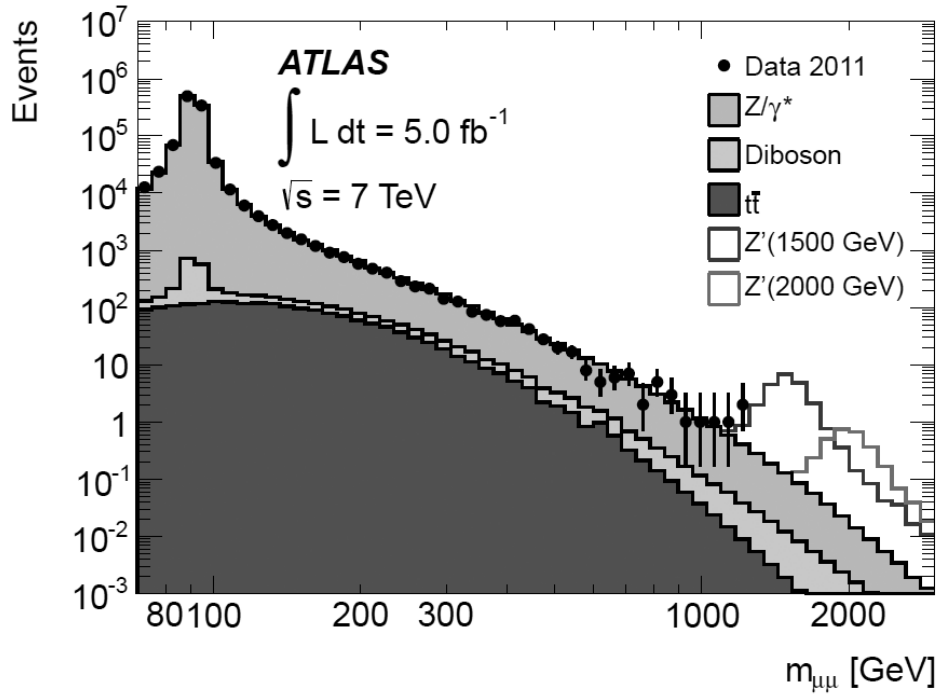


Рис. 4: Распределение событий по инвариантной массе мюонов в конечном состоянии для данных ATLAS 2011 года [2]. Черными маркерами показано распределение данных вместе со статистической погрешностью. Это распределение сравнивается с суммой распределений основных фоновых процессов, показанных гистограммами с серой заливкой. Кроме этого – на рисунке показаны распределения сигнальных процессов  $Z^*$  для полюсных масс резонанса 1.5 и 2.0 ТэВ.

вариантной массы в данных 2012 года.

В этой же главе излагаются методы оценки статистической совместимости наблюдаемых в эксперименте данных с гипотезами существования сигнала  $Z^*$  всевозможных масс. Процедура этой оценки заключается в генерации определенного числа наборов псевдо экспериментальных данных, в каждом из которых разыгрываются случайным образом распределения фоновых (в пределах систематических вариаций) и сигнального (в предположении равномерного распределения вероятности сечения нового резонанса) процессов. Для каждого из псевдоэкспериментов вычисляется функция правдоподобия, как произведение пуассоновских вероятностей для количества событий в данных и псевдоэксперименте в каждом из столбцов гистограммы распределения инвариантной массы. Значение этой функции является критерием совмести-

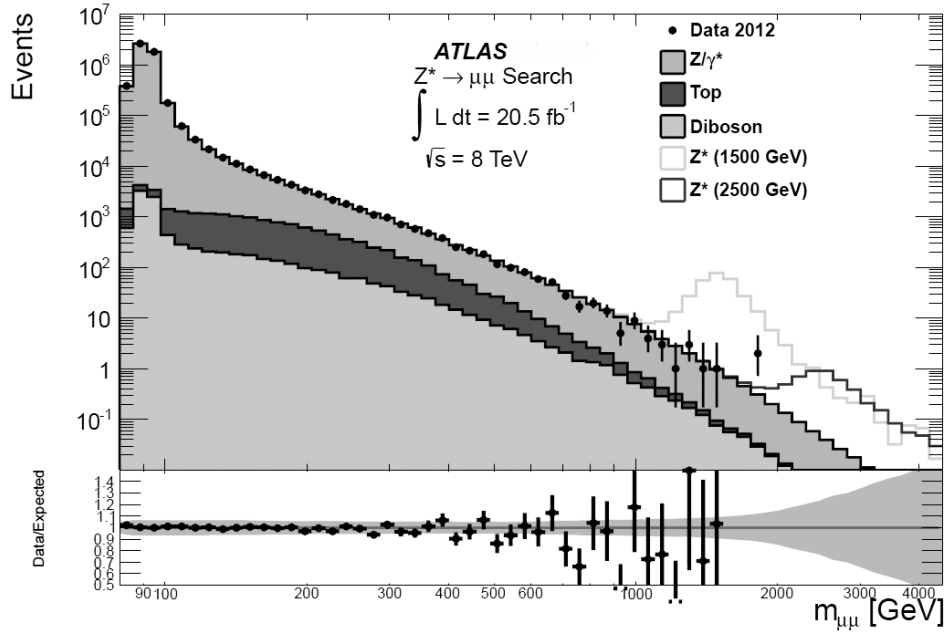


Рис. 5: Распределение событий по инвариантной массе мюонов в конечном состоянии для данных ATLAS 2012 года [3]. Черными маркерами показано распределение данных вместе со статистической погрешностью. Это распределение сравнивается с суммой распределений основных фоновых процессов, показанных гистограммами с серой заливкой. Кроме этого – на рисунке показаны распределения сигнальных процессов  $Z^*$  для полюсных масс резонанса 1.5 и 2.5 ТэВ. Внизу показано отношение количества событий в данных к количеству событий процессов Стандартной модели, а также систематическая погрешность распределения фона (окаймление серого цвета).

мости данных с гипотезами сигналов. Ожидаемые пределы сечений  $Z^*$  вычислены с использованием распределений смоделированных событий, включающих только процессы Стандартной модели. Наблюдаемые пределы исключения нового резонанса вычислены с использованием данных экспериментальной установки. На Рисунке 6 показаны пределы сечения на относительную ширину распада резонанса  $Z^*$  для разных полюсных масс, полученные на основании статистического анализа данных 2012 года в димюонном канале (вверху) и в комбинации димюонного и диэлектронного каналов (внизу). Пунктирными линиями показаны ожидаемые пределы сечения резонанса  $Z^*$ . Окаймления серого цвета иллюстрируют погрешности ожидаемого предела в 1 и 2 стандартных отклонения. Сплошные серые линии соответ-

Таблица 2: Сравнение количества событий в данных ATLAS 2011 года и процессов Стандартной модели для разных диапазонов реконструированной инвариантной массы мюонов. В качестве неопределенностей количества фоновых событий приведена полная (статистическая + систематическая) погрешность. Использовано правило округления PDG.

$m_{\mu\mu}[\text{ГэВ}]$	200-400	400-800	800-1200	1200-3000
$Z/\gamma^*$	$2090 \pm 230$	$173 \pm 15$	$7.7 \pm 0.8$	$0.98 \pm 0.16$
Топ	$270 \pm 50$	$18 \pm 11$	$0.32 \pm 0.07$	$0.019 \pm 0.007$
Дибозон	$97 \pm 24$	$11.8 \pm 2.7$	$0.59 \pm 0.26$	$0.087 \pm 0.016$
Всего	$2460 \pm 240$	$203 \pm 19$	$8.7 \pm 0.9$	$1.09 \pm 0.16$
Данные	2294	197	10	2

Таблица 3: Сравнение количества событий в данных ATLAS 2012 года и процессов Стандартной модели для разных диапазонов реконструированной инвариантной массы мюонов. В качестве неопределенностей количества фоновых событий приведена полная (статистическая + систематическая) погрешность. Использовано правило округления PDG.

$m_{\mu\mu}[\text{ГэВ}]$	200-400	400-800	800-1200	1200-3000	3000-4500
$Z/\gamma^*$	$10800 \pm 1000$	$1000 \pm 100$	$49 \pm 5$	$7.3 \pm 1.1$	$0.034 \pm 0.022$
Топ	$2300 \pm 400$	$160 \pm 80$	$3.0 \pm 1.7$	$0.17 \pm 0.15$	$0 \pm 0$
Дибозон	$520 \pm 130$	$64 \pm 16$	$4.2 \pm 2.1$	$0.69 \pm 0.30$	$0.0024 \pm 0.0019$
Всего	$13700 \pm 1000$	$1180 \pm 130$	$56 \pm 6$	$8.15 \pm 1.2$	$0.036 \pm 0.023$
Данные	13479	1122	49	8	0

ствуют наблюдаемым пределам сечения  $Z^*$ . Сплошными черными линиями с серым окаймлением показано теоретическое значение сечения на относительную ширину распада резонанса  $Z^*$  и его неопределенность. В Таблице 4 приведены значения верхних пределов сечений на вероятность распада  $Z^*$ , полученные как результат статистического анализа данных в димюонном и в комбинации димюонного и диэлектронного каналов. В Таблице 5 приведены



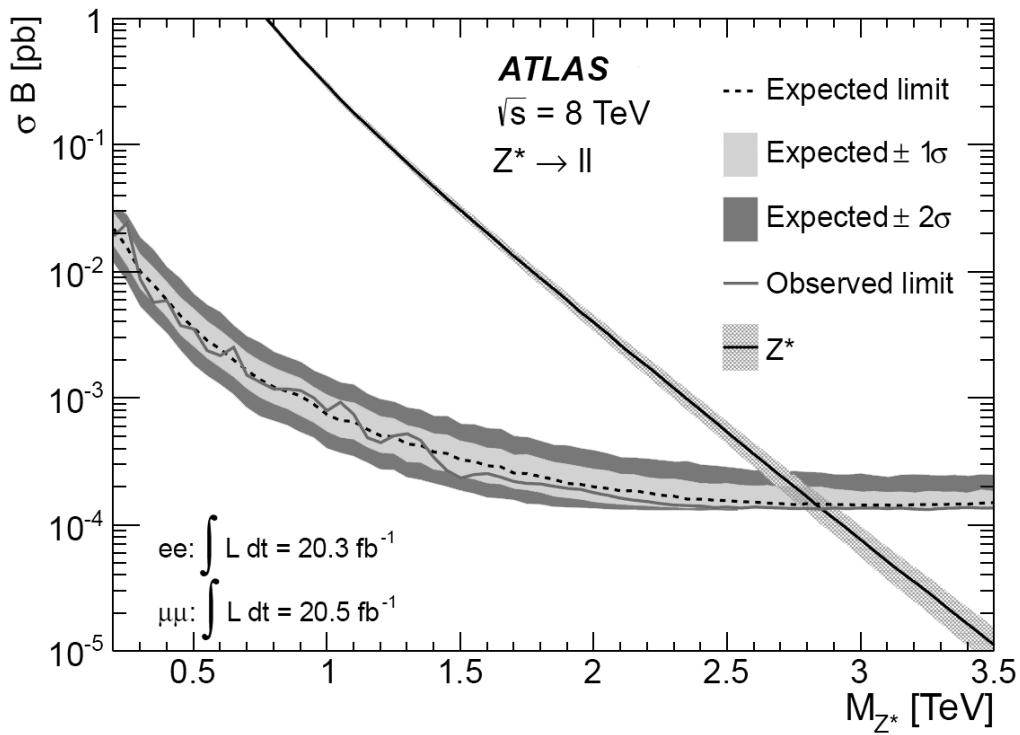
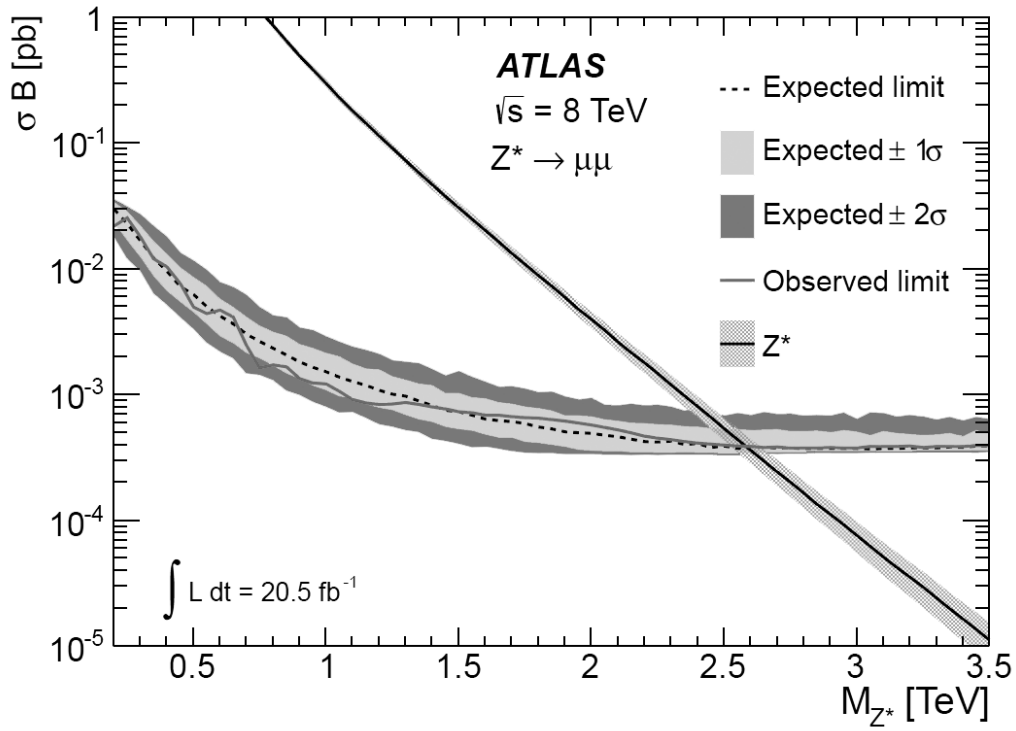


Рис. 6: Пределы сечения на относительную ширину распада резонанса  $Z^*$  для разных полюсных масс, полученные на основании статистического анализа данных 2012 года в димюонном канале (вверху) и в комбинации димюонного и диэлектронного каналов (внизу).

значения верхних пределов массы резонанса  $Z^*$ , найденные в точке пересечения кривых экспериментальных пределов сечений и кривой сечения  $Z^*$ , рассчитанного в теории.

Таблица 4: Вычисленные с уровнем достоверности 95% наблюдаемые пределы сечения  $Z^*$  различных масс в димюонном и комбинации димюонного и диэлектронного каналов на основании данных 2012 года.

Масса, ТэВ $Z^*$	Предел $\sigma B Z^* \rightarrow \mu\mu$ , фб	Предел $\sigma B Z^* \rightarrow \mu\mu, ee$ , фб
0.3	14.4	8.37
0.5	6.31	5.03
0.7	2.99	1.86
1.0	2.41	0.424
1.5	0.492	0.312
2.0	0.459	0.229
2.5	0.431	0.194
3.0	0.351	0.152
3.5	0.388	0.138

Таблица 5: Верхние пределы массы нового резонанса  $Z^*$ , полученные в димюонном канале и в комбинации димюонного и диэлектронного каналов.

	$Z^* \rightarrow \mu^+\mu^-$	$Z^* \rightarrow l^+l^-$
Наблюдаемый предел, ТэВ	2,58	2,85
Ожидаемый предел, ТэВ	2,58	2,82

## Заключение

1. Впервые предложен поиск нового тяжелого нейтрального резонанса  $Z^*$  в данных экспериментальной установки ATLAS в конечных состояниях с двумя лептонами. Исследованы наблюдаемые свойства нового резонанса  $Z^*$ , дается оценка возможности идентификации этого типа резонансов с учетом уникальных кинематических распределений лептонов в распадах  $Z^*$ ;
2. Оптимизированы критерии отбора событий с двумя мюонами применительно к поиску тяжелых резонансов;
3. Смоделированы процессы рождения новых бозонов  $Z^*$  в протон-протонных столкновениях в эксперименте ATLAS, определены эффективности отбора событий, связанных с рождением  $Z^*$  и его распадом в димюонном канале. Разработаны процедуры улучшения качества моделирования событий, связанных с процессами Стандартной модели, определены основные источники и вычислены величины систематических неопределенностей в распределениях фоновых событий по инвариантной массе;
4. Создано программное обеспечение отбора событий и анализа экспериментальных данных, проанализированы данные протон-протонных столкновений, набранные экспериментом ATLAS в 2011, 2012 годах, интегральной светимостью около  $25 \text{ фб}^{-1}$  в канале с двумя мюонами в конечном состоянии, исследована статистическая совместимость данных с гипотезами существования резонансов  $Z^*$  всевозможных масс. В отсутствие статистически значимых отклонений данных от предсказаний Стандартной модели – установлены новые экспериментальные ограничения на параметры модели  $Z^*$  – сечения и массу. Так, экспериментальное ограничение на массу  $Z^*$  составляет 2.85 ТэВ с уровнем достоверности 95%;
5. Проанализированы перспективы поисков  $Z^*$  в следующих циклах набора данных экспериментом ATLAS;

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. *I.V. Yeletskikh et al.*, Anomalously interacting new extra bosons and their first LHC constraints, *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei*, 2012, vol. 43, part 3, p. 610-635;
2. *I.V. Yeletskikh et. al.*, Search for  $Z^*$  Boson at ATLAS Detector, *Physics of Particles and Nuclei*, 45 (2014), p. 252;
3. *I.V. Yeletskikh, The ATLAS Collaboration*, Search for high-mass dilepton resonances in 21fb-1 of pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS experiment, *Phys. Rev.*, 2014, D90, 052005; ArXiv: 1405.4123;
4. *I.V. Yeletskikh, V.A. Bednyakov, M.V. Chizhov*, Search for  $Z^*$  boson at ATLAS detector, The 20th International Symposium SPIN PHYSICS (SPIN 2012), September 17-22, 2012, Dubna, Book of Abstracts, p. 190;