

Официальный оппонент:  
старший научный сотрудник ФГБУН ИЯИ РАН,  
кандидат физико-математических наук,  
Кирсанов Михаил Михайлович  
108840, Россия, г. Москва, г. Троицк,  
ул. Физическая, вл. 27  
8(495)850-42-50  
Mikhail.Kirsanov@cern.ch

## ОТЗЫВ

на диссертацию Е.В. Черемушкиной «Поиск возбужденных электронов и дибозонных резонансов в конечном состоянии с лептоном, нейтрино и струями на детекторе ATLAS на LHC», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

В современном описании физики частиц используется Стандартная модель, имеющая некоторые пробелы в объяснении ряда экспериментальных наблюдений, таких как слабость гравитационного взаимодействия, существование темной материи и энергии, наличие трех поколений фермионов, осцилляции нейтрино, иерархия между электрослабым и планковским масштабами, асимметрия распространенности частиц и античастиц во вселенной. Представленная работа как раз и посвящена наиболее актуальному современному направлению исследований в физике высоких энергий – поиску проявлений расширений Стандартной модели.

Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения. Библиография включает 133 наименования. Кроме того, основная часть диссертации дополнена обширным иллюстративным материалом в виде рисунков и таблиц, помещенных в приложения.

Во введении сформулированы актуальность темы исследования, цель диссертационной работы, выносимые на защиту положения, степень достоверности и апробация результатов, новизна, личный вклад автора и структура диссертации.

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

Вторая глава посвящена краткому описанию детектора ATLAS, его подсистем, а также, системы сбора и хранения данных.

В третьей главе описаны использованные в работе экспериментальные данные, моделирование сигнальных наборов данных, необходимых для оптимизации отбора событий в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов, и инструменты, использованные для моделирования основных фоновых процессов для сигнальных моделей обоих поисков.

В четвертой главе подробно описаны отборы отдельных объектов в событии и первичный отбор событий в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов. Приведены процедуры и критерии, требуемые для реконструкции, идентификации, изоляции и ассоциации с первичной вершиной электронов и мюонов. Упомянуты алгоритмы реконструкции струй, потерянной поперечной энергии, мечения  $b$ -струй и  $W$ -бозонов.

Пятая глава посвящена оценке основных фоновых процессов в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов. Кроме того, кратко описан матричный метод, используемый для оценки вклада фона ложной идентификации электронов в поиске возбужденных электронов. Полные композиции фоновых процессов в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов после первичного отбора событий приведены в таблицах и дополнительно проиллюстрированы гистограммами по основным кинематическим переменным.

В шестой главе описан выбор дискриминирующих переменных и метод построения сигнальных областей путем максимизации модифицированного критерия значимости, а также, построение контрольных и проверочных областей в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов. Подробное описание дополнено таблицами и рисунками.

Все источники систематических неопределенностей, учитываемых в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов, перечислены в седьмой главе. Систематические неопределенности разделены на две категории: теоретические и экспериментальные. В Приложениях приведены подробные таблицы с вычисленными статистическими и систематическими неопределенностями в поиске возбужденных электронов.

В заключительной восьмой главе кратко обсуждается статистическая модель, построенная в поисках возбужденных электронов и дибозонных резонансов. Основной акцент сделан на результаты, полученные в обоих анализах. Приведены полученные ограничения на параметры сигнальных моделей. Для сравнения проиллюстрированы результаты, полученные в аналогичных поисках, проведенных ранее.

В заключении подытожены полученные результаты и выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа содержит значительное количество **новых** результатов, в частности:

1. Впервые на LHC произведён поиск возбужденных электронов в конечном состоянии с электроном, нейтрино и струями на данных, полученных в протон–протонных столкновениях с беспрецедентно высокой энергией пучков в системе центра масс 13 ТэВ. 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.



2. Произведён поиск дибозонных резонансов в конечном состоянии с электроном, нейтрино и струями. Для гравитона Калуца–Клейна в модели Рэндалл–Сандрума были получены наиболее жесткие ограничения снизу на массу в сравнении с анализами, проведенными на данных с энергией в системе центра масс 8 ТэВ в экспериментах ATLAS и CMS в других конечных состояниях.

Научная ценность работы не вызывает сомнений. По изложению содержания работы и по тексту диссертации, есть несколько замечаний, связанных в основном с тем, что не приведена некоторая информация, нужная для полного понимания анализа

- 1) Нет описания организации программного обеспечения детектора ATLAS.
- 2) На странице 32 в формуле 3.1 недостаточно чётко определена  $\epsilon_{filter}$ . Можно понять что она возникает из-за потерь событий в процессе моделирования, и тогда на неё нужно делить.
- 3) На странице 42 нет разъяснений формулы для  $u_f$ . (хотя бы ссылку если нет места).
- 4) На странице 43 неясно, применялось ли  $b$  – мечение для широких струй. Описание было бы яснее если сказать что это мечение основано на поиске вершины распада частиц с  $b$  – кварком.
- 5) На странице 52 нет информации каким образом определялось отношение эффективностей данные/МС (из данных? tag & probe?).
- 6) На странице 77 изложение было бы яснее если разделить неопределённости, влияющие на выход сигнала и на фон, а также описывать их в порядке убывания важности (влияния на конечный результат).
- 7) На странице 86 в таблице не приведён ожидаемый сигнал, поэтому трудно понять насколько сложно его обнаружить.

Отдельные фразы в тексте неправильно построены (например, на странице 36 “синхротронное излучение с возможностью потери” -> “синхротронное излучение и возможность потери”), есть несколько орфографических ошибок и опечаток, но очень мало для такого большого объёма текста.

Сделанные замечания не умаляют значения полученных результатов и не снижают высокого научного уровня диссертации. Диссертация Черемушкиной Е.В. «Поиск возбужденных электронов и дибозонных резонансов в конечном состоянии с лептоном, нейтрино и струями на детекторе ATLAS на LHC» представляет собой выполненную на высоком уровне научно-квалификационную работу, содержащую результаты, имеющие практическую и теоретическую ценность для развития физики высоких энергий. Личный вклад автора не вызывает сомнения. Проведенные исследования прошли апробацию в коллаборации ATLAS, на международных конференциях, опубликованы в журналах, индексируемых международными базами данных.

Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Автор,

Черемушкина Е.В., заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

«15» июня 2020 г.

Старший научный сотрудник  
ФГБУН ИЯИ РАН, к.ф.-м.н.

М.М. Кирсанов

Подпись Кирсанова Михаила Михайловича заверяю

Ученый секретарь ИЯИ РАН,  
к.ф.-м. н.



А.В. Вересникова

Зам. директора

ИЯИ

РАН

Г.И. Рубцов