

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Рыжова Андрея Валерьевича
«Исследование парного рождения векторных бозонов с последующим
распадом на заряженные лептоны и адроны в эксперименте ATLAS»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.23 - физика высоких энергий

Поиск редких процессов в ускорительных экспериментах требует высокой интенсивности столкновений ускоряемых начальных частиц, что приводит к усложнению задачи выделения треков заряженных частиц, проходящих детектор. Высокая множественность вторичных частиц, рождаемых в столкновениях, приводит к необходимости развития методов выделения отдельных треков и оптимизации методов реконструкции конечных частиц. Диссертационная работа А.В. Рыжова посвящена решению задачи оптимизации регистрации конечных состояний с ассоциативным рождением двух калибровочных бозонов W , Z в эксперименте ATLAS, проводимом в ЦЕРН, Швейцария. На основе проведенной оптимизации триггера исследованы процессы парного рождения калибровочных W , Z бозонов в рамках Стандартной модели (СМ) и проведен поиск возможных отклонений от предсказаний СМ в рамках трех расширений СМ. Для решения поставленной задачи были применены современные методы и получены актуальные результаты по измерению сечений исследуемых процессов и ограничениям на параметры, характеризующие возможный вклад «Новой физики» в исследуемых расширениях СМ. Эксперимент ATLAS является одним из четырех экспериментов, проводимых на наиболее мощном современном ускорителе – Большом адронном коллайдере (БАК). Актуальность проведенных исследований и разработанных методов обусловлена их прямым применением в ведущем современном эксперименте по физике высоких энергий, и использованием наиболее эффективных и современных подходов к решению поставленных задач.

Диссертационная работа оформлена в виде введения, семи глав, заключения и четырех приложений общим объемом 180 страниц текста и 155 ссылок на литературу.

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе сформулированы теоретические представления, лежащие в основе проводимых исследований. Кратко представлены основные положения Стандартной модели. Описаны процессы парного рождения W , Z бозонов. Приведено краткое описание трех рассматриваемых моделей за рамками СМ, выбранными для экспериментального поиска их возможного проявления.

Вторая глава содержит детальное описание экспериментальной установки. Последовательно рассмотрены подсистемы детектора ATLAS и физические принципы регистрации различных объектов в соответствующих частях детектора. Описаны методы триггерной обработки и записи данных, получаемых в эксперименте ATLAS.

Третья глава посвящена мюонному триггеру, разработанному при непосредственном участии диссертанта в рамках защищаемых исследований. Представлена мотивация проведенных исследований. Детально описана аппаратная и программная реализация нового триггера. Приведены результаты внедрения триггера в эксперимент и оценки его эффективности.

В четвертой главе описаны основные принципы реконструкции и идентификации физических объектов по сигналам с различных подсистем детектора. Детально

описаны методы идентификации электронов, мюонов, адронных струй. Приведены аппаратные ограничения на области идентификации по угловым и энергетическим характеристикам. Оценена разрешающая способность детектора для реконструируемых объектов. Описан метод тагирования струй от b -кварков. В контексте конкретной исследуемой задачи измерения парного рождения W , Z бозонов представлены алгоритмы регистрации широких адронных струй, актуальных для регистрации высокоэнергичных W , Z бозонов, распадающихся по адронному каналу.

В пятой главе кратко описаны методы моделирования исследуемых жестких процессов, влияние структурных функций протонов, моделирование отклика детектора и учет дополнительных мягких событий. Приведена методика измерения сечений жестких процессов и методы статистического анализа данных эксперимента. Кратко описан метод многомерного анализа наблюдаемых, основанный на технике деревьев решений.

Шестая глава посвящена поиску дополнительных резонансов, распадающихся в пару W , Z бозонов и предсказываемых в рамках трех выбранных моделей за рамками SM . Описана стратегия анализа, методы моделирования сигнальных и фоновых процессов и критерии отбора кандидатов в сигнальные события на основе различных характеристик рождающихся объектов. Выделены различные области фазового пространства, используемые для оценки вклада различных процессов. Разобраны различные неопределенности, влияющие на проводимые измерения. Проведен статистический анализ отобранных событий в данных и моделировании с учетом всех неопределенностей. Статистически значимого сигнала от исследуемых процессов за рамками SM не обнаружено и были установлены верхние ограничения на сечения таких процессов в зависимости от массы возможного дополнительного резонанса. Измерения, проведенные на небольшой экспериментальной статистике за первый год, были оптимизированы и повторены на полной доступной статистике эксперимента ATLAS, полученной в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ, что позволило заметно ужесточить ограничения на вклад рассмотренной «Новой физики».

Глава седьмая посвящена первому экспериментальному измерению процессов ассоциативного рождения пары W , Z бозонов и двух адронных струй ($ZZjj$, $WZjj$). Процесс рассмотрен в рамках SM , с указанием на поиск возможных отклонений в сечении за счет возможного проявления «Новой физики». Описана стратегия измерения сечений, этапы моделирования и анализа данных. Исследован набор наблюдаемых высокого уровня, чувствительных к сигнальным и фоновым процессам. Проведен анализ наблюдаемых методом деревьев решений. Оценен вклад возможных неопределенностей измерений и проведен статистический анализ отобранных событий с учетом выявленных неопределенностей. Проведена оценка возможного отклонения в сечении за счет вклада «Новой физики». В результате было измерено сечение сигнальных процессов, и констатировано его согласие с предсказаниями SM .

Основные результаты работы, выносимые на защиту, представлены в заключении. В приложениях приведены список литературы, список рисунков, таблиц, список использованных сокращений и ряд более детальных описаний различных частей исследований. Все методы и результаты, представленные в диссертации, прошли проверку коллаборации ATLAS и опубликованы от имени коллаборации. Различные аспекты исследований представлялись автором диссертации на международных конференциях.

В качестве замечаний к диссертационной работе следует отметить следующее. На странице 9 приведены теоретические предсказания сечений без указания как бы-

ли получены эти числа, пояснения можно найти в последующих главах. В секции 1.5, страница 19, было бы уместно привести эффективный лагранжиан исследуемой модели, учитывая своеобразную параметризацию констант связи. На странице 68 и далее, при описании статистического анализа, выбрано страшное наименование для части случайных (nuisance) параметров - "неинформативные параметры". В секциях 5.3, 5.4 было бы уместно написать об используемой программной реализации методов статистического анализа и деревьев решений. Возможно, логичнее было бы поменять местами главы 6 и 7, и первым представлять результаты по измерению сечения в рамках Стандартной модели, а в следующей главе описывать поиск отклонений от предсказаний СМ. Существенная часть исследований посвящена созданию нового триггерного пути, но нет описания коррекции эффективности триггера в моделировании. Только на странице 88 упоминается, что такие поправочные коэффициенты малы. В таблице 14, стр.112, можно было прояснить, что чем меньше уровень значимости переменной, тем она более значима. Исходя из утверждения на стр. 111, что наиболее значимой переменной для RR области является ширина струи, было бы закономерно привести эту переменную на рисунке 7.3, стр.114, а не в приложении в конце диссертации. Обычно, указанная переменная плохо моделируется и можно ожидать заметных различий в распределениях, аналогичных приведенным на рисунке 7.3 для других переменных. Сложности с моделированием этой переменной являются одной из причин, по которым требуется создание специального дискриминатора кварковых и глюонных струй. В таблице 16 секции 7.5 стр.119 наибольшая неопределенность связана с конечностью статистики смоделированных событий, но нет пояснения как вычислялась эта ошибка. Обычно, этот вклад оценивается методом Барлоу-Бистона.

Однако, высказанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу. Результаты, полученные в ходе данного исследования, являются новыми, использованные методики обеспечивают их достоверность. Положения, выносимые на защиту, основаны на результатах, полученных с помощью современных и эффективных методов анализа и обработки данных, прошедших всестороннее обсуждение в рамках коллаборации ATLAS, в процессе представления результатов на международных конференциях и в процесс реферирования и публикации, в силу чего являются обоснованными и достоверными. Результаты работы имеют существенное значение для экспериментальной физики элементарных частиц и могут быть использованы в последующих экспериментах и при проверке различных новых фундаментальных теорий за рамками СМ.

Текст автореферата в полной мере отражает содержание диссертации, сформулирован личный вклад автора, материал диссертации отражен в публикациях, указанных в автореферате.

Диссертация Рыжова А.В. на соискание ученой степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, в которой содержатся результаты исследований в современном коллайдерном эксперименте ATLAS. Диссертация представляет собой законченную квалификационную работу, имеет научную новизну и практическую значимость, соответствует критериям, установленным Правительством Российской Федерации, а ее автор, Рыжов Андрей Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий.

Заведующий Лабораторией электрослабых
и новых взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ,
к.ф.-м.н.

Л.В. Дудко

Подпись Л.В. Дудко заверяю
Секретарь Ученого совета НИИЯФ МГУ,
к.ф.-м.н.

Е.А. Сигаева



«10» сентября 2021 г.

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.
Скобельцына (НИИЯФ МГУ), <http://www.sinp.msu.ru>, info@sinp.msu.ru
Лев Владимирович Дудко
Тел.: +7 495 939 58 81
E-mail: lev.dudko@cern.ch