

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук Гаврилова Владимира Борисовича на диссертацию 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»

Диссертация Андрея Валерьевича Рыжова посвящена экспериментальному исследованию парного рождения векторных бозонов в протон-протонных взаимодействиях при энергиях в системе центра масс 13 ТэВ. Экспериментальные данные были получены на установке ATLAS, работающей на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе. Были получены новые экспериментальные ограничения на массы тяжелых экзотических частиц, распадающихся на пары векторных бозонов, и измерены сечения парного образования векторных бозонов в электрослабых процессах при 13 ТэВ.

Образование массивных пар векторных бозонов предсказывается в ряде теоретических моделей вне рамок Стандартной Модели (СМ), описывающей в настоящее время все процессы в области физики высоких энергий. Поиск процессов вне рамок СМ является одной из наиболее актуальных задач экспериментальной физики высоких энергий. Ранее поиск новых тяжелых частиц, распадающихся на пары векторных бозонов проводились в экспериментах ATLAS и CMS при энергиях протон-протонных столкновений 7 и 8 ТэВ, но, представленные в диссертации результаты, позволили значительно расширить диапазон исключенных масс для таких состояний. Поэтому результаты диссертации безусловно являются новыми и актуальными.

В первой главе диссертации подробно обсуждается современный теоретический подход к описанию процессов в pp -взаимодействиях при

высоких энергиях. Обсуждаются как СМ, так и ряд моделей для процессов вне рамок СМ, которые могут проявляться в образовании массивных дибозонных состояний.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальной установки ATLAS, всех ее компонентов, методам отбора, реконструкции и обработки полученных данных.

Основным методическим вкладом диссертанта в эксперимент ATLAS были разработка, создание и включение в набор данных мюонного триггера адронного калориметра. Введение этого компонента в триггерную систему эксперимента позволило значительно подавить фоновые срабатывания мюонного триггера в диапазоне псевдобыстрот $1.0 < |\eta| < 1.3$ и, как следствие, уменьшить частоту срабатывания мюонного триггера без потери эффективности к регистрации мюонов. Автором было разработано программное обеспечение этого нового триггера, были осуществлены введение его в эксплуатацию и калибровка. Эти работы заслуживают самой высокой оценки и свидетельствуют о высокой квалификации А.В. Рыжова как физика-экспериментатора.

Четвертая глава диссертации посвящена реконструкции и идентификации физических объектов, используемых для анализа. Электроны реконструируются по кластерам в электромагнитном калориметре и их соответствию трекам во внутреннем детекторе. Остается непонятным как учитывается информация о величине сигналов детектора переходного излучения при идентификации электронов. Подробно описаны алгоритмы реконструкции различных типов адронных струй. В основе реконструкции струй лежит кластеризация сигналов от калориметров. Различаются «тонкие» и «толстые» струи разного радиуса. Распад векторного бозона с относительно небольшим поперечным импульсом идентифицируется как две тонкие струи, а в случае большого поперечного импульса — как одна толстая струя с массой близкой к массе векторного бозона. Анализ структуры толстой струи используется для подавления фонов

от КХД струй. Используется алгоритм b -мечения тонких и трековых струй, образованных b -кварками. Трековые струи играют вспомогательную роль для разделения сигнальных и фоновых событий. Используется механизм удаления совпадений, когда электрон, мюон или струя основаны на одних и тех же сигналах от детектора ATLAS. Если разделение электронов и мюонов или электронов и струй не вызывает сомнений, то в случае разделения мюонов и струй остается непонятным как мюон с большим поперечным импульсом может давать сигнал в калориметре с близкой энергией? (на стр.63 сказано: «Аналогично для мюонов — тонкая струя удаляется, если $\Delta R(j, \mu) < 0.2$ и либо струя имеет меньше трех связанных с ней треков, либо разница в энергии и импульсе между мюоном и струей невелика.»).

Пятая глава посвящена методике анализа данных и получению результатов методами статистического анализа. Поиску дибозонных резонансов ZZ и ZW посвящена шестая глава. Поиск резонансов был проведён в эксперименте ATLAS на данных 2015–2016 годов, полученных в pp -столкновениях при энергии 13 ТэВ на статистике, соответствующей интегральной светимости 3.2 fb^{-1} в 2015 году, и 32.9 fb^{-1} в 2016 году. Анализировалось три класса моделей образования тяжелых дибозонных состояний: тяжёлый нейтральный бозон Хиггса H со спином 0 в приближении узкого резонанса в двухдублетной хиггсовской модели, W' - бозон со спином 1 в модели тяжёлого векторного триплета и КК-гравитон $G_{\text{КК}}$ со спином 2 в расширенной модели Рэндалл-Сандрума. Анализировались процессы слияния глюонов (ggF) и векторных бозонов (VBF) для образования тяжелого бозона Хиггса, процесс Дрелла-Яна и VBF для образования W' и ggF для образования $G_{\text{КК}}$. Используются два различных метода реконструкции распада $V \rightarrow qq$: разделение и объединение кварков. В первом случае регистрируется две узких струи, а во втором — одна толстая струя с массами близкими к массе векторного бозона. Тяжёлые частицы должны проявляться в виде пиков над фоном SM в распределениях по инвариантной массе конечного состояния $\ell\ell qq$. В качестве фона

рассматривались события СМ, приводящие к появлению таких же наблюдаемых объектов, как и сигнальные события.

Сигнальные и фоновые события моделировались с помощью стандартных генераторов событий и пакета на основе G4 для моделирования сигналов установки ATLAS. После реконструкции физических объектов, удаления совпадений и калибровок, описанных в главе 4, требовалось, чтобы объекты удовлетворяли определенным кинематическим критериям. Для поиска каждого типа резонансов отбирались сигнальные области (SR) с максимальным исключением фоновых событий и контрольные области (CR), в которых практически нет сигнальных событий. Контрольные области использовались для нормировки соответствующих фонов во время фитирования. Совместный фит данных в сигнальных и контрольных областях показал хорошее согласие наблюдений с предсказаниями СМ без наличия экзотических тяжелых бозонных резонансов.

Подробно проанализированы источники систематических погрешностей, включающие как экспериментальные погрешности, так и погрешности моделирования. Статистический анализ полученных результатов позволил установить пределы на сечения и ограничения на допустимые массы искомых экзотических дибозонных резонансов. Диапазоны значений пределов значительно превосходят предыдущие, полученные на данных сеанса Run-1 в экспериментах ATLAS и CMS.

Затем подобный анализ с небольшими изменениями был повторён на статистике, набранной за период 2015–2018 годов, что соответствует интегральной светимости 139 фб^{-1} . Трёхкратное увеличение статистики позволило поднять значения нижнего предела на массы резонансов приблизительно на 30 %.

Седьмая глава посвящена поиску электрослабого рождения $ZZjj$ и $ZWjj$. Один из наиболее интересных процессов в современной экспериментальной физике — рассеяние векторных бозонов $VV \rightarrow VV$ (Vector Boson Scattering, VBS). Сечения электрослабого рождения $VVjj$

измерялись в полностью лептонных конечных состояниях в экспериментах ATLAS и CMS сеанса Run-1 и находятся в хорошем согласии с предсказаниями SM. В диссертации представлены результаты первого измерения сечения электрослабого рождения $ZVjj$ с последующим полулептонным распадом $ZV \rightarrow \ell\ell qq$ на данных 2015–2016 годов сеанса Run-2. Вследствие большей статистики в области высоких масс дибозонной системы, полулептонные каналы потенциально более чувствительны по сравнению с лептонными к проявлениям новой физики. Рождение $VVjj$ в SM на древесном уровне может происходить либо исключительно через вершины электрослабого взаимодействия (EW $VVjj$), либо также включать две дополнительные вершины сильного взаимодействия (QCD $VVjj$). В свою очередь электрослабое рождение EW $VVjj$ условно делится на процесс рассеяния векторных бозонов (VBS) и все остальные электрослабые процессы без рассеяния бозонов (non-VBS). Фоновую EW компоненту non-VBS невозможно строго отделить от сигнальной VBS, сохраняя калибровочную инвариантность. Так как фоновые процессы non-VBS вносят значительный вклад в общее сечение рождения EW $VVjj$, то они объединяются с процессом VBS при моделировании сигнала. В результате измеряется сечение процесса EW $VVjj$. Имеется интерференция между амплитудами процессов QCD $VVjj$ и EW $VVjj$. Вклад этой интерференции оказался небольшим для отобранных событий и он учитывался как систематическая погрешность в результате.

Для увеличения статистической точности результата использовался классификатор BDT многомерного анализа на основе программного пакета TMVA. В результате статистического анализа данных было получено хорошее согласие величины сечения EW $VVjj$ с предсказанием SM на более высоком, чем ранее, уровне значимости.

А.В. Рыжов продемонстрировал в диссертации глубокие знания методики физического эксперимента и анализа данных. Все результаты диссертации хорошо обоснованы и достоверны. Их актуальность и новизна

не вызывают сомнений. Внедренный диссертантом в эксперимент ATLAS мюонный триггер адронного калориметра позволил эффективно отбирать события с мюонами при уменьшении фоновой загрузки. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для уточнения теоретических моделей с образованием тяжелых резонансов пар векторных бозонов при высоких энергиях.

Диссертация Андрея Валерьевича Рыжова представляет завершённое научное исследование и написана ясным языком.

Материалы диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа А.В. Рыжова «Исследование парного рождения векторных бозонов с последующим распадом на заряженные лептоны и адроны в эксперименте ATLAS» полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, (п.9-14), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Андрей Валерьевич Рыжов, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 — «физика высоких энергий».

117218, Россия, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25

НИЦ "Курчатовский институт" — ИТЭФ

Тел. 8 (499) 789-62-12, e-mail: vladimir.gavrilov@itep.ru

Доктор физико-математических наук (01.04.01 — экспериментальная физика)

начальник лаборатории ФГБУ "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова" Национального

исследовательского центра "Курчатовский
Институт" (НИЦ "Курчатовский институт" –
ИТЭФ)

Гаврилов Владимир Борисович

В.Г.Е.

Подпись Гаврилова Владимира Борисовича удостоверяю:
Ученый секретарь НИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ
кандидат физ.-мат. наук В.В. Васильев

В.В. Васильев
«30» августа 2021 года

