

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ)

14 октября 2021 г.

Заседание Диссертационного совета Д 201.004.01

Протокол № 2021-8

Стенограмма заседания Диссертационного совета Д 201.004.01

Защита диссертации Рыжова Андрея Валерьевича
«Исследование парного рождения векторных бозонов с последующим распадом
на заряженные лептоны и адроны в эксперименте ATLAS»
по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий

Председатель: председатель Диссертационного совета Д 201.004.01 доктор физико-математических наук, профессор, Тюрин Николай Евгеньевич.

Секретарь: учёный секретарь Диссертационного совета Д 201.004.01 кандидат физико-математических наук Прокопенко Николай Николаевич.

Всего членов совета: 22 человека.

Присутствует: 20 человек.

На заседании присутствуют следующие члены Диссертационного совета Д 201.004.01:

1. Тюрин Н.Е., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02 - председатель;
2. Зайцев А.М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23 - заместитель председателя;
3. Прокопенко Н.Н., кандидат физ.-мат. наук, 01.04.23 – учёный секретарь;
4. Арбузов Б.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
5. Денисов С.П., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
6. Зайцев Ю.М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
7. Иванов С.В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
8. Козуб С.С., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
9. Мочалов В.В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
10. Образцов В.Ф., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
11. Петров В.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;

12. Петрухин А.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
13. Полозов С.М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
14. Разумов А.В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
15. Саврин В.И., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
16. Сенько В.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
17. Ткаченко Л.М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
18. Трошин С.М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
19. Фещенко А.В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
20. Чесноков Ю.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20.

Диссертационный совет Д 201.004.01 утверждён приказом по Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки № 105/нк от 11 апреля 2012 года, с частичными изменениями в соответствии с приказом по Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки № 898/нк от 23 июля 2021 года, в составе 22-х человек. На заседании присутствуют 20 членов совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий, кворум имеется. На заседании присутствует также официальный оппонент кандидат физ.-мат. наук Дудко Лев Владимирович.

Тюрин Н.Е. объявляет повестку дня: Защита диссертации Рыжова Андрея Валерьевича «Исследование парного рождения векторных бозонов с последующим распадом на заряженные лептоны и адроны в эксперименте ATLAS» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий.

Николай Николаевич, пожалуйста, приступим к процедуре.

Прокопенко Н.Н. представляет материалы, имеющиеся в деле: Соискатель, Рыжов Андрей Валерьевич, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, в 2020 году окончил аспирантуру НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Работу выполнял в Отделении экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

Научным руководителем является Мягков Алексей Григорьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

Официальными оппонентами выступают: Гаврилов Владимир Борисович, доктор физико-математических наук, начальник Лаборатории экспериментальной ядерной физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ и Дудко Лев Владимирович, кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией электрослабых и новых взаимодействий НИИЯФ МГУ.

Ведущей организацией является Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна.

В деле имеется положительное заключение организации, где выполнялась работа, также имеются положительные отзывы официальных оппонентов и положительный отзыв ведущей организации.

Тюрин Н.Е.: Есть вопросы по этой части? Нет? Андрей Валерьевич, Вам слово для изложения сути диссертации.

Рыжов А.В.: Уважаемый председатель, уважаемые члены диссертационного совета, вашему вниманию представляется доклад по диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Исследование парного рождения векторных бозонов с последующим распадом на заряженные лептоны и адроны в эксперименте ATLAS».

Изучение парного рождения векторных бозонов является перспективным направлением с точки зрения поиска новой физики. Например, многие модели за пределами Стандартной модели предсказывают существование новых тяжелых частиц, которые распадаются на пару векторных бозонов, так называемую дибозонную систему. В данной работе рассматривались три типа частиц с разными спинами: тяжелый нейтральный бозон Хиггса со спином 0 в двухдублетной хиггсовской модели, векторный W' -бозон со спином 1 в модели тяжёлого векторного триплета и Калуца–Клейновские возбужденные состояния гравитона G_{KK} со спином 2 в расширенной модели Рэндалл–Сандрума. Также были рассмотрены разные механизмы рождения данных резонансов: процессы слияния глюонов, процессы Дрелла–Яна и процессы слияния векторных бозонов. Последний процесс можно отличить от предыдущих по двум дополнительным струям, обычно разлетающимся рядом с осью пучка протонов. Поиски таких резонансов уже проводились в экспериментах ATLAS и CMS на данных первого сеанса работы Большого адронного коллайдера (БАК) 2009–2013 годов. Существование таких частиц обнаружено не было, но были установлены пределы на их сечения рождения и массы. Например, исключены массы ниже 1.5 ТэВ для W' -бозона и ниже 0.75 ТэВ для гравитона G_{KK} .

Также во многих моделях прогнозируется нерезонансное проявление новой физики через изменение сечения процесса рассеяния векторных бозонов (VBS), предсказанного в электрослабом секторе Стандартной модели (СМ). Вообще говоря, в СМ процесс VBS определяется неабелевой природой группы симметрии электрослабой теории и включает в себя вершины взаимодействия векторных бозонов друг с другом (трёхбозонные и четырёхбозонные вершины), а также вершины с бозоном Хиггса. Точно также, как и для процесса слияния векторных бозонов при поиске резонансов, отличительной чертой этого процесса является наличие помимо электрослабого рождения пары векторных бозонов VV ($ZZ/WW/WZ$) двух дополнительных адронных струй jj , разлетающихся в

противоположных направлениях рядом с осью пучка протонов. Впервые на данных 2015–2016 годов второго сеанса работы БАК удалось достичь статистической значимости наблюдения сигнала электрослабого рождения $VVjj$ в полностью лептонных конечных состояниях VV в 5σ , что позволяет убедительно утверждать о существовании процесса VBS в рамках СМ. Параллельно этому анализу выполнялся анализ в полулептонные каналы распада, результаты которого будут представлены в данном докладе.

Сформулирую основные цели работы. Во-первых, провести поиск тяжёлых резонансов и наложить экспериментальные ограничения на теоретические модели в дибозонном канале распада с конечным состоянием $llqq$, в котором один Z -бозон распадается на пару электронов или мюонов, а второй Z - или W -бозон распадается по адронной моде. Вторая основная цель – измерить сечение электрослабого рождения $ZVjj$ с последующим распадом $ZV \rightarrow llqq$. Также была поставлена сопутствующая цель – обеспечить триггерное подавление ложных мюонных событий в передних кинематических областях детектора ATLAS путем введения в эксплуатацию мюонного триггера адронного калориметра. В данных анализах реконструируются мюоны, поэтому улучшенный триггерный отбор мюонных событий положительным образом будет влиять на точность получаемых результатов.

Система триггера установки ATLAS после модернизации во втором сеансе представляет собой триггер первого уровня, выполненный на аппаратном уровне, и триггер высокого уровня, выполненный программным образом. Перед вторым сеансом работы БАК в центральный триггер первого уровня был введён топологический триггер, а на помощь мюонному триггеру пришёл новый триггер – мюонный триггер адронного калориметра, подробно представленный далее в данном докладе. Основным источником фона мюонного триггера в передних кинематических областях детектора ATLAS являются протоны с низким импульсом, вылетающие из торцов тороидальных магнитов и системы защитного экранирования пучка. Чтобы подавить эти фоновые события в области $1.0 < |\eta| < 1.3$, реализована система совпадений с адронным калориметром (TileCal). Для этого были подключены ячейки D5, D6 внешнего слоя адронного калориметра к мюонному триггеру, который работает на тонкозачерных камерах в этом интервале псевдобыстрот. После включения данного триггера уменьшается количество срабатываний мюонного триггера приблизительно в два раза в области $1.0 < |\eta| < 1.3$, что указывает на эффективное подавление фоновых событий в этом диапазоне псевдобыстрот.

Реализация проекта проходила следующим образом. Перед вторым сеансом в контрольной комнате вблизи детектора установлены новые электронные платы (TMDB), которые были разработаны для приема, оцифровки и обработки данных, поступающих из каналов D-ячеек боковых цилиндрических

секций TileCal. Далее модуль TMDb оценивает выделившуюся энергию и сравнивает её с пороговыми значениями. Триггерное решение направляется на электронные платы обработки тонкозачерненных камер, где мюонным триггером принимается окончательное триггерное решение.

После успешного ввода триггера в эксплуатацию частота срабатываний мюонного триггера по всей области псевдобыстрот уменьшилась приблизительно на 6%, что позволяет снизить нагрузку на систему сбора данных, при этом эффективность обнаружения мюонов падает незначительно (не более, чем на 2.5%). Данный триггер успешно функционирует на установке ATLAS с 2015 года, причем его модернизация продолжается.

Перейдем теперь к одной из основных работ – поиску дибозонных резонансов. Фактически было выполнено три поиска, причем в разных областях анализа, разбитых по типу рождения резонансов: слияние глюонов, слияние векторных бозонов, процессы Дрелла-Яна. Также области делились по типу реконструкции адронного распада $V \rightarrow qq$: либо адроны реконструируются одной толстой струей большого радиуса, либо двумя тонкими струями малого радиуса. Дополнительно вводились контрольные области, чтобы использовать их для нормировки соответствующих фонов. Все разбиения по категориям и регионам, отборы событий выполнены так, чтобы максимизировать значимость по приведённой формуле. Для каждой представленной модели отбор событий отличается. Вначале отбирались события с двумя мюонами или с двумя электронами, инвариантная масса которых попадает в массовое окно Z -бозона. Далее в этих событиях проводился поиск одной толстой струи или двух тонких струй, которые попадали в массовое окно W - или Z -бозона. Если это происходило, то событие считалось в сигнальной области, в противном случае – событие попадало в контрольную область. Кинематический отбор оптимизирован для каждого типа сигнала и выполнен в виде обрезания по дискриминирующей переменной. Основным источником фона выступает ассоциированное рождение струй с Z -бозоном, а вторым и третьим по значимости – нерезонансное рождение дибозонов в СМ и процессы рождения топ-кварков (одиночного t -кварка или пары tt) соответственно.

После оценки неопределенностей было проведено фитирование по всем сигнальным и контрольным областям в рамках фоновой гипотезы, когда сила сигнала предполагается равной нулю. Нормировочные параметры фоновых процессов, как видно из таблицы, близки к единице, что соответствует ожиданиям СМ. В результате из распределения событий по основной дискриминирующей переменной, инвариантной массе $llqq$, видно, что наблюдаемые данные хорошо соответствуют предсказаниям СМ. Однако на данных 2015–2016 годов в районе 800 ГэВ был обнаружен дефицит событий наблюдаемых данных с уровнем статической значимости в 3σ . В следующей

итерации анализа при его улучшении на большей статистике, соответствующей 139 fb^{-1} , данный эффект не подтвердился. Затем были наложены следующие ограничения: верхние пределы на сечения рождения данных резонансов и нижние пределы на их массы. Во втором сеансе проведено три итерации анализов на разных статистиках, в последней из них были установлены следующие новейшие ограничения: для модели тяжёлого векторного триплета не существует W' -бозона ниже 4 ТэВ , а для расширенной модели Рэндалл-Сандрум не существует гравитона ниже 2 ТэВ .

Перейдем ко второй основной цели данной работы – поиску электрослабого рождения $ZZjj$ и $ZWjj$. В качестве основы для изучения этого процесса выступает анализ по поиску дибозонных резонансов, рожденных через процесс слияния векторных бозонов, с точно таким же конечным состоянием $ZVjj$. Использовались уже подготовленные экспериментальные данные и триггеры, отборы объектов, фоновые наборы данных Монте-Карло, категоризация событий по сигнальным и контрольным областям. Дополнительно был смоделирован новый сигнал – процесс электрослабого рождения $ZVjj$. Дело в том, что фоновый процесс электрослабого рождения без рассеяния векторных бозонов не представляется возможным строго отделить от сигнала VBS, сохраняя калибровочную инвариантность, поэтому оба эти процесса вместе рассматривались как сигнал.

Использование стандартной техники по установлению пороговых значений на отдельные дискриминирующие переменные обеспечивает ожидаемую статистическую значимость сигнала лишь на уровне в 1.5σ . Поэтому было принято решение использовать один из методов машинного обучения – ансамбль деревьев решений (BDT). За счёт использования корреляций между входными дискриминирующими переменными BDT удалось повысить ожидаемую статистическую значимость до 2.5σ . В таблице, представленной на данном слайде (слайд №16), приведены все входные дискриминирующие переменные, которые использовались для обучения этого классификатора. Выход классификатора BDT в разных регионах анализа, показанный на данном рисунке (слайд №17), принимался в качестве основной дискриминирующей переменной, и по нему проводилось фитирование в рамках сигнальной гипотезы, когда сила сигнала считалась больше нуля. В итоге наблюдается хорошее согласие между экспериментальными данными и предсказанием СМ. По результатам объединения всех полулептонных каналов фоновая гипотеза исключается с наблюдаемой статистической значимостью 2.7σ при ожидаемой значимости в 2.5σ .

После определения фазового объёма, доступного эксперименту, впервые было проведено измерение сечения электрослабого рождения $ZVjj$ с последующим распадом $ZV \rightarrow llqq$. Из таблицы с результатами (слайд №18)

следует, что измеренные сечения согласуются с предсказаниями Стандартной модели. После объединения полученных результатов с данными каналов распада дибозонов, содержащих нейтрино, впервые выполнено измерение сечения электрослабого рождения $VVjj$ по всем полулептонным конечным состояниям ($\sigma = 45.1 \pm 8.6(\text{стат.}) \pm_{-14.6}^{+15.9}(\text{сист.})$ фб), что также хорошо согласуется с предсказаниями Стандартной модели ($\sigma = 43.0 \pm 2.4(\text{теор.})$ фб).

В заключении приведу основные положения, выносимые на защиту:

- Результаты триггерного подавления ложных мюонных событий в передних кинематических областях детектора ATLAS за счет введения в эксплуатацию мюонного триггера адронного калориметра. Усовершенствованный триггерный отбор мюонных событий положительным образом влияет на точность результатов всех анализов данных, в которых необходима реконструкция мюонов.
- Новые верхние пределы на сечения дибозонных резонансов в полулептонных модах распада и нижние пределы на массы резонансов, при которых существование резонансов с меньшими массами исключено, на уровне достоверности 95% для модели тяжёлого векторного триплетта, двухдублетной хиггсовской модели и расширенной модели Рэндалл-Сандрума. Полученные оценки пределов на сечения и массы резонансов являются наилучшими из существующих на данный момент.
- Результаты первого измерения сечения электрослабого рождения $VVjj$ по всем полулептонным конечным состояниям, и, в частности, результаты измерения в канале $ZV \rightarrow llqq$. Полученные значения сечений находятся в согласии с предсказаниями Стандартной модели.

Спасибо за внимание.

Тюрин Н.Е.: Спасибо. Вопросы, пожалуйста.

Петров В.А.: Покажите, пожалуйста, слайд, где был изображён КХД фон. Почему кварки не могут излучить два векторных бозона без обмена глюоном, чтобы в t -канале был кварк? Или это даёт малый вклад в такой процесс?

Рыжов А.В.: В данный процесс тоже входят такие фоновые диаграммы.

Петров В.А.: Это просто пример одной из диаграмм, но не единственный?

Рыжов А.В.: Да, конечно.

Петров В.А.: Спасибо.

Тюрин Н.Е.: Еще есть вопросы? Если вопросов нет, тогда переходим к оглашению письменных заключений и отзывов. Слово предоставляется Прокопенко Н.Н.

Прокопенко Н.Н.: Первое заключение – это заключение организации, в которой выполнялась диссертация. Разрешите его зачитать.

Прокопенко Н.Н. зачитывает заключение организации, где выполнялась диссертация (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ):

Диссертация на тему «Исследование парного рождения векторных бозонов с последующим распадом на заряженные лептоны и адроны в эксперименте ATLAS» выполнена Рыжовым Андреем Валерьевичем. Научным руководителем является Мягков Алексей Григорьевич. В 2014 году Рыжов А.В. окончил физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, а в 2020 году окончил аспирантуру НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

По итогам обсуждения на заседании семинара Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ принято следующее заключение: диссертационная работа Рыжова А.В. выполнена на высоком научном уровне при непосредственном участии соискателя. В диссертации обобщены результаты поисков тяжёлых дибозонных резонансов и поиска ассоциированного электрослабого рождения пары векторных бозонов VV ($ZZ/WW/WZ$) с массивной двухструйной системой jj . Исследования проведены в эксперименте ATLAS на данных, полученных в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Рыжов А.В. является ведущим специалистом по полуплептонному каналу распада дибозонов $ZV \rightarrow llqq$, в котором Z -бозон распадается на лёгкие заряженные лептоны, а второй Z - или W -бозон распадается по адронной моде. В процессе проведения анализа автором были отобраны дибозонные события, получены оценки вкладов фоновых процессов, выбраны дискриминирующие переменные, определены сигнальные и контрольные области, проведена оценка влияния систематических неопределённостей, выполнена проверка статистической совместимости экспериментальных данных с предсказаниями СМ.

При активном участии Рыжова А.В. в 2015 году введён в эксплуатацию новый мюонный триггер адронного калориметра (L1 Tile-Muon), который позволил значительно подавить фон в передних кинематических областях детектора ATLAS. Автором разработано программное обеспечение по контролю и управлению электронной платы L1 Tile-Muon триггера. Во время сеанса 2015-2018 гг. Рыжовым А.В. проводился мониторинг эффективности работы триггера, осуществлялась поддержка программного обеспечения и сопутствующей инфраструктуры триггерного процессора.

В диссертации представлены:

1. Результаты триггерного подавления ложных мюонных событий в передних кинематических областях детектора ATLAS за счёт введения в эксплуатацию L1 Tile-Muon триггера.
2. Результаты оптимизации критериев отбора событий, а также классификации событий по сигнальным и контрольным областям для

поиска тяжёлых дибозонных резонансов и поиска событий электрослабого рождения $VVjj$.

3. Результаты работы классификатора событий, основанного на одном из методов машинного обучения – ансамбле деревьев решений (BDT), который увеличивает эффективность разделения сигналов электрослабого рождения $VVjj$ и фоновых процессов.
4. Результаты оценки систематических погрешностей моделирования методом Монте-Карло фоновых и сигнальных процессов.
5. Результаты статистического анализа по оценке степени согласованности между экспериментальными данными и предсказаниями СМ.
6. Верхние пределы на сечения рождения резонансов X , умноженные на вероятности их дибозонного распада, $\sigma \cdot \text{Br}(X \rightarrow ZV)$, и нижние пределы на массы X , при которых существование резонансов с меньшими массами исключено, на уровне достоверности 95% для модели тяжёлого векторного триплета (существование W' -бозона с массами ниже 4 ТэВ исключено), двухдублетной хиггсовской модели и расширенной модели Рэндалл-Сандрума (существование гравитона G_{KK} с массами ниже 2 ТэВ исключено). Полученные оценки пределов на сечения и массы резонансов являются наилучшими из существующих на данный момент.
7. Результаты первого измерения сечения электрослабого рождения $VVjj$ по всем полулептонным конечным состояниям ($\sigma = 45.1 \pm 8.6(\text{стат.}) \pm_{14.6}^{15.9}(\text{сист.}) \text{ фб}$), и, в частности, результаты измерения в канале $ZV \rightarrow llqq$ ($\sigma = 14.2 \pm 3.6(\text{стат.}) \pm_{4.2}^{4.6}(\text{сист.}) \text{ фб}$) находятся в согласии с предсказаниями СМ.

Материалы диссертации опубликованы в 9 научных работах, из которых 6 опубликованы в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus. Публикации приведены в отзыве.

Теоретическая и экспериментальная части работы представлены в диссертации в надлежащем объёме. Тематика работы полностью соответствует специальности 01.04.23 – физика высоких энергий. Диссертационная работа рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Заключение принято на заседании семинара Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. На заседании присутствовало 16 человек, среди которых 6 докторов и 4 кандидата физико-математических наук по необходимой специальности. Результаты открытого голосования: «за» – 16 человек, «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел. Подписал отзыв секретарь семинара, ведущий научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук Сергей Анатольевич Садовский, утвердил – директор НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, доктор физ.-мат. наук, академик РАН Сергей Владиславович Иванов.

Тюрин Н.Е.: Николай Николаевич, прошу зачитать отзыв ведущей организации – ОИЯИ.

Прокопенко Н.Н.: зачитывает отзыв ведущей организации (Объединенный институт ядерных исследований):

В отзыве вначале говорится о структуре и объёме диссертации, состоящей из введения, заключения и семи глав. В заключении сформулированы основные физические результаты диссертационной работы: впервые проведено измерение сечения электрослабого рождения $ZZjj$, $ZWjj$ и $WWjj$ в полулептонных конечных состояниях, которое хорошо согласуется с предсказанием Стандартной модели; и установлены верхние пределы на сечения рождения тяжёлых резонансов, распадающихся по дибозонному каналу с одним Z -бозоном, реконструируемым в дилептонной моде, которые предсказываются в рамках двухдублетной хиггсовской модели, модели тяжёлого векторного триплета и расширенной модели Рэндалл-Сандрума. Кроме того, для последних двух моделей установлены нижние ограничения на массы соответствующих резонансов (тяжёлого векторного бозона W' и гравитона Калуцы-Клейна G_{KK} соответственно) для определённых характерных значений параметров этих моделей. Результат получен с использованием данных, набранных в 2015–2018 гг. при энергии pp -соударений 13 ТэВ.

Установленные экспериментальные ограничения на рассматриваемые процессы являются существенно более строгими по сравнению с полученными ранее в экспериментах ATLAS и CMS с использованием данных первого сеанса работы БАК (при энергии 8 ТэВ). Таким образом, данные результаты диссертационной работы, являясь практической проверкой моделей физики за пределами СМ, способны существенно ограничить спектр допустимых параметров этих моделей и могут служить указаниями при дальнейшей разработке теорий таких классов.

В рамках другой части работы за счёт введения в эксплуатацию нового мюонного триггера адронного калориметра удалось существенно снизить потоки ложных мюонов, регистрируемых триггером первого уровня в области псевдобыстрот $1.0 < |\eta| < 1.3$ при незначительных потерях эффективности для истинных мюонов.

Изложение работы последовательно, достаточно подробно и вместе с тем лишено избыточности. Описание собственной работы автора предварено качественным литературным обзором по теме диссертации. Текст написан хорошим русским языком, использование неизбежных в работах по данной тематике англоязычных жаргонизмов умерено и гармонично, всем используемым нетривиальным понятиям и аббревиатурам даются чёткие определения.

Можно отметить следующие замечания к работе:

- В тексте используется профессиональный жаргон и присутствуют неточности перевода англоязычных терминов: «толстые струи», «тонкие струи», «фидуциарное сечение», «фидуциарный фазовый объём».
- В параграфе 3.4 при описании программного обеспечения нового триггера, разработанного автором, полезно было бы привести наглядную блок-схему.
- В параграфе 4.6 упомянут алгоритм мечения вершины струи (JVT), но не пояснено, на чём основана логика его работы, хотя он применяется для отбора струй в ходе анализа данных.

Данные замечания не являются критическими, относятся исключительно к представлению, но не к содержанию и результатам работы, и не умаляют общей высокой её оценки.

Диссертационная работа Рыжова Андрея Валерьевича на тему «Исследование парного рождения векторных бозонов с последующим распадом на заряженные лептоны и адроны в эксперименте ATLAS» выполнена в соответствии с требованиями, предъявляемыми правительством Российской Федерации в постановлении от 24 сентября 2013 г. № 842 о порядке присуждения учёных степеней. Автореферат отражает содержание диссертации. Автор заслуживает присуждение ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Отзыв составлен заместителем директора Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ им. В.П. Дзелепова по научной работе, доктором физико-математических наук Глаголевым Владимиром Викторовичем, а также подписан директором ЛЯП ОИЯИ, доктором физико-математических наук Бедняковым Вадимом Александровичем и утвержден директором ОИЯИ, доктором физико-математических наук, академиком РАН Трубниковым Григорием Владимировичем.

Тюрин Н.Е.: Имеются ли еще письменные отзывы на диссертацию Рыжова А.В.?

Прокопенко Н.Н.: Осталось два отзыва от официальных оппонентов. Других письменных отзывов, поступивших на диссертацию Рыжова А.В., нет.

Тюрин Н.Е.: Имеется ли официальное письмо от коллаборации ATLAS, в котором дается согласие на использование опубликованных результатов соискателем?

Прокопенко Н.Н.: Да, такое письмо в деле имеется.

Тюрин Н.Е.: Хорошо. Андрей Валерьевич, Вам слово для ответа на замечания.

Рыжов А.В.: Замечания к диссертации, поступившие от ОИЯИ, в основном, относятся к стилистике изложения. Со всеми замечаниями я полностью согласен. Поясню по поводу последнего замечания: алгоритм мечения вершины струи основан на технике многомерного анализа kNN, так называемого метода

ближайших соседей. Значительный объём диссертации (180 страниц) не позволил описать все используемые алгоритмы подробно, поэтому приходилось выбирать, что менее детально изложить и на чём больше сконцентрироваться.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Андрей Валерьевич. Слово предоставляется научному руководителю Алексею Григорьевичу Мягкову.

Мягков А.Г.: Андрей Валерьевич Рыжов начал заниматься детектором ATLAS ещё на последних курсах обучения в МГУ и его дипломная работа посвящена этому эксперименту. И естественно, когда он пришел работать в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, то и дальнейшая его деятельность была связана с установкой ATLAS. Квалификационная работа Рыжова А.В. в эксперименте ATLAS была связана с реализацией мюонного триггера по данным адронного калориметра, и это позволило в некоторой кинематической области существенно подавить ложные срабатывания. Данная работа была успешно выполнена и новый триггер использовался при наборе данных во втором сеансе.

Дибозонная физика очень богата, во-первых, традиционными измерительными проверками СМ и тем, что могут быть найдены интересные проявления физики за пределами СМ. Андрей Валерьевич детально исследовал один из каналов, там, где Z -бозон и второй бозон либо Z , либо W . Распад Z -бозона в лептоны – значительно чистый канал и достаточно статистически значимый, потому что второй векторный бозон берется по адронной моде. В этих исследованиях анализ разбит на множество поданализов для того, чтобы получить максимальную значимость. Данное дробление означает, что объём работы увеличивается, и вместе с тем, значимость сигнала получается наиболее высокой, что соискатель и сделал. За годы работы Андрей Валерьевич существенно вырос как физик-экспериментатор в этом очень непростом анализе и фактически был лидером по этому направлению исследований. Поэтому я считаю, что он, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Алексей Григорьевич. Теперь мы переходим к выступлению официальных оппонентов. Владимир Борисович Гаврилов отсутствует на заседании. Николай Николаевич, прошу зачитать его отзыв.

Прокопенко Н.Н. зачитывает отзыв официального оппонента Гаврилова В.Б.:

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 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.

В диссертации представлено описание каждой из глав, что уже звучало неоднократно, поэтому я на этом не буду заострять внимание, а сразу перейду к замечаниям:

- При идентификации электронов остается непонятным как учитывается информация о величине сигналов детектора переходного излучения.
- В механизме удаления совпадений, 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»)?

Рыжов А.В. 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 А.В. Рыжова представляет завершенное 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.

Тюрин Н.Е.: Андрей Валерьевич, Вам слово для ответа на замечания.

Рыжов А.В.: С первым замечанием я согласен. Дело в том, что сигналы от детектора переходного излучения являются верифицирующей характеристикой

при идентификации электронов, поэтому это не было подробно изложено в диссертации при описании алгоритмов идентификации.

Со вторым замечанием я также согласен. Оппонентом отмечено сложное для понимания предложение в тексте диссертации, которое неаккуратно написано и вводит читателей в заблуждение. Конечно, имелось в виду сравнение не энергий, а импульсов между мюоном и треками, ассоциированными со струей. Если импульсы близки между собой, тогда струя выбрасывалась из события механизмом удаления совпадений как остаточная от пролёта мюона. Спасибо.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Андрей Валерьевич. Вторым оппонентом является Лев Владимирович Дудко из Московского государственного университета. Пожалуйста, Вам слово.

Дудко Л.В.: Добрый день. Диссертация Рыжова А.В. состоит из трёх основных элементов: первый – методическая работа, связанная с триггером; второй – это анализ в рамках Стандартной модели; третий – это поиск отклонений от СМ. У меня довольно детальный отзыв на четырех страницах, но всё это я не буду читать, отмечу сразу замечания. В основном все замечания стилистические, а по сути работы серьезных претензий нет.

В первую очередь можно сказать, что логичнее перестроить порядок глав, то есть вначале говорить об измерениях в рамках СМ, а потом уже говорить о поиске отклонений от СМ. Как обычно в общем-то и делается – сначала разрабатывается методика эксперимента, потом проверяется и измеряется то, что в рамках существующей теории, и потом уже переходят к поиску каких-то отклонений. В работе выбрано три модели в качестве поиска отклонений.

Вернемся к замечаниям. Перестройка логики диссертации – это первое замечание. Есть целый ряд таких вопросов: вначале приводятся какие-то числа, сечения и не сразу понятно, откуда эти сечения взяты, потом по тексту объясняется как получены эти сечения. В этом смысле, скорее вопрос к аккуратности оформления диссертации. Есть некоторые неточности, интеллектуальные напряжения, связанные с именованием статистических параметров, например, «неинформативные параметры». Как мне кажется, не очень хорошее обозначение или перевод на русский язык.

Поскольку любой триггер требует некоторой коррекции к моделированию, то можно было бы добавить в диссертацию описание процедуры коррекции. Когда вводятся теоретические дополнительные модели, то в некоторых местах не плохо было бы привести эффективный лагранжиан, из которого была бы видна параметризация этой модели. Также можно отметить, что когда учитываются систематические ошибки, есть довольно стандартные подходы, которые интенсивно обсуждаются между экспериментами CMS и ATLAS. Какие систематические ошибки учитываются? Как они учитываются? Чтобы можно

было все это согласовать между собой и провести объединение результатов двух экспериментов. Работа такая сложная, для этого организованы целые большие группы, и консенсуса там очень сложно добиться, но тем не менее некоторые вещи уже понятны. В частности, например, есть одна из систематических ошибок, связанная с конечностью статистики смоделированных методом Монте-Карло данных. Эта ошибка обычно определяется методом Барлоу-Бистона. В диссертации не очень подробно было показано как это сделано. Также не показано, точнее не прояснены детали, как проводился статистический анализ. Скорее всего был взят стандартный пакет типа HistFactory. Но нет сомнения, что это было сделано правильно, потому что все результаты прошли одобрение коллаборации ATLAS. В этом смысле это не вопрос достоверности результатов, это вопрос только к оформлению диссертационной работы.

Все эти высказанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на профессиональном уровне. Все результаты достоверны, проверены, представлены и опубликованы. У меня нет сомнений, что Андрей Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук за проделанную работу. Спасибо.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Лев Владимирович. Пожалуйста, Андрей Валерьевич, Вам слово для ответа на замечания.

Рыжов А.В.: Со всеми замечаниями я полностью согласен. Большая часть замечаний носит стилистический характер.

Поясню по поводу триггера и коррекции эффективности триггера в моделировании. Согласно поставленным целям – задача была ввести новый триггер в эксплуатацию и обеспечить его работу. Оценка коррекций эффективности триггера в моделировании проводилась коллегами по коллаборации, поэтому не включена в диссертацию. Лев Владимирович, Вы абсолютно правы, для общего понимания необходимо было это тоже включить в диссертацию.

Кратко отвечу на комментарий про неопределенности, связанные с конечностью статистики смоделированных данных. Да, Вы совершенно правы, данные неопределенности оценивались стандартным для анализов ATLAS образом, так называемым методом Барлоу-Бистона. Спасибо.

Тюрин Н.Е.: Лев Владимирович, Вы хотите продолжить обсуждение?

Дудко Л.В.: Андрей Валерьевич исчерпывающе ответил. Основные замечания были только к аккуратности оформления диссертации.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Лев Владимирович. Теперь переходим к общей дискуссии. Есть ли желающие высказаться, выступить? Нет? Тогда Вам заключительное слово, пожалуйста, Андрей Валерьевич.

Рыжов А.В.: В заключение хочу искренне поблагодарить своего научного руководителя Алексея Григорьевича Мягкова за открытие мира физики высоких энергий в таком большом эксперименте как ATLAS. Также я хочу поблагодарить коллег по адронному калориметру установки ATLAS Олега Владимировича Соловьянова и Александра Александровича Солодкова. И, конечно, хотел бы поблагодарить всех коллег по коллаборации ATLAS за совместную плодотворную работу. Спасибо.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Андрей Валерьевич. Теперь перейдем к процедуре голосования. В счётную комиссию предлагается делегировать Василия Вадимовича Мочалова (председателя), Владимира Алексеевича Петрова и Сергея Сергеевича Козуба. Есть другие предложения? Нет. Предлагаю утвердить состав избранной комиссии открытым голосованием. Единогласно. Приступаем к процедуре тайного голосования.

Перерыв на голосование.

Тюрин Н.Е.: Уважаемые члены диссертационного совета, давайте заслушаем итоги голосования. Слово предоставляется председателю счетной комиссии Мочалову В.В.

Мочалов В.В.: Протокол №4-21 заседания счетной комиссии, избранной диссертационным советом Д 201.004.01 от 14 октября 2021 года. Состав избранной комиссии: Мочалов В.В., Козуб С.С., Петров В.А. Комиссия избрана для подсчета голосов при тайном голосовании по диссертации Рыжова Андрея Валерьевича на тему «Исследование парного рождения векторных бозонов с последующим распадом на заряженные лептоны и адроны в эксперименте ATLAS» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Постоянный состав диссертационного совета Д 201.004.01 утверждён в количестве 22 человек. В состав диссертационного совета дополнительно введены 0 человек. На заседании присутствовало 20 членов совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – 6. Роздано бюллетеней – 20. Осталось не розданных бюллетеней – 2. Оказалось в урне бюллетеней – 20.

Результаты голосования по вопросу о присуждении учёной степени кандидата физико-математических наук Рыжову Андрею Валерьевичу: «за» – 20, «против» – 0, «недействительных бюллетеней» – 0.

Тюрин Н.Е.: Давайте открытым голосованием утвердим протокол? Нет возражений? Нет. Единогласно. Тогда мы принимаем решение, протокол утвержден.

Теперь необходимо принять заключение диссертационного совета по представленной диссертации. Проект заключения был роздан, какие будут замечания? Нет существенных замечаний? Нет. Давайте примем это заключение с учетом стилистических поправок. Есть возражения? Нет. Воздержавшиеся есть? Нет. Заключение принимается единогласно.

Тюрин Н.Е.: Андрей Валерьевич, поздравляю Вас с успешной защитой и желаю Вам новых достижений!

Рыжов А.В.: Спасибо.

Тюрин Н.Е.: Уважаемые члены совета, спасибо, всего наилучшего.

Заседание Диссертационного совета завершено.

Председатель
диссертационного совета



Тюрин Н.Е.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Н.Н. Прокопенко

Прокопенко Н.Н.

14 октября 2021 г.