

## Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук Гаврилова Владимира Борисовича на диссертацию Краснопевцева Дмитрия Васильевича «Рождение  $Z$  и последующим распадом  $Z$  на нейтрино и антинейтрино в эксперименте ATLAS и аномальные вершины взаимодействия четырех нейтральных бозонов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – «физика высоких энергий»

Диссертация Дмитрия Васильевича Краснопевцева посвящена экспериментальному исследованию процесса образования  $Z$ -бозона и двух высокоэнергичных фотонов в протон-протонных взаимодействиях при энергии в системе центра масс 8 ТэВ. Экспериментальные данные были получены на установке ATLAS, работающей на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе.

Поиск процессов за рамками Стандартной Модели в настоящее время является одной из наиболее актуальных задач физики высоких энергий. Возможные аномальные взаимодействия калибровочных бозонов - это один из таких процессов. Поэтому тематика данной диссертации безусловно актуальна.

Основным вкладом диссертанта в эксперимент ATLAS было детальное исследование характеристик Трекового детектора переходного излучения (ТДПИ), который был предложен для эксперимента российскими учеными, спроектирован и изготовлен при их ведущем участии. ТДПИ предназначен для уточнения параметров треков заряженных частиц и для идентификации электронов. Была подробно исследована эффективность ТДПИ в широком диапазоне загрузок детектора, в том числе и в области адронных струй. Показано, что импульсное разрешение для заряженных частиц может быть заметно улучшено, если для реконструкции импульса помимо терковых кремниевых детекторов использовать сигналы ТДПИ. Поскольку величина

недостающей поперечной энергии является одной из основных наблюдаемых, используемых в диссертации для анализа событий с Z-бозоном, то было бы интересно увидеть насколько данные с ТДПИ позволяют улучшить разрешение установки АТЛАС и по недостающей поперечной энергии.

Высокая эффективность идентификации электронов в ТДПИ позволяет надежно регистрировать конверсию высокоэнергичных фотонов в веществе установки АТЛАС. Это позволило повысить эффективность отбора событий с Z-бозоном и двумя энергичными фотонами, которые использовались для физического анализа в диссертации.

Детальное сравнение различных характеристик ТДПИ, измеренных в эксперименте, с результатами моделирования продемонстрировало хорошее согласие между ними. Это согласие указывает на высокую достоверность результатов моделирования характеристик физических процессов, регистрируемых в установке АТЛАС.

Для анализа процесса образования Z-бозона с двумя фотонами диссертантом была выбрана мода распада Z-бозона на 2 нейтрино. Такая мода имеет большую вероятность по сравнению с распадом на два заряженных лептона. Кроме того, отсутствие в этой моде фотонов, излучаемых в конечном состоянии, к значительно меньшему сечению процессов СМ и, как следствие, к более жестким ограничениям на аномальные вершины 4-бозонных взаимодействий по сравнению с распадами на заряженные лептоны.

Для анализа были использованы события, зарегистрированные установкой АТЛАС при столкновении протонов при энергии в системе центра масс равной 8 ТэВ. Интегральная светимость для этих данных была около  $20\text{fb}^{-1}$ . Сначала отбирались события с двумя фотонами, имеющими поперечные энергии более 22 ГэВ. Затем накладывалось условие на изоляцию этих фотонов в угловом пространстве относительно других высокоэнергичных объектов. Для каждого события на основе баланса

поперечных импульсов зарегистрированных частиц определялась недостающая поперечная энергия, которая для искомым событий была обусловлена поперечными импульсами нейтрино, не регистрируемых в установке.

Для анализа отбирались события с недостающей поперечной энергией более 110 ГэВ и с большой разницей азимутальных углов двухфотонной системы и вектора недостающего поперечного импульса. Такой отбор позволил оптимизировать соотношение сигнальных и фоновых событий в исследуемом образце.

Поскольку одним из основных источников фоновых событий был процесс образования  $W$ -бозона и двух фотонов, с последующим распадом на заряженный лептон и нейтрино, то был введен запрет на наличие мюонных и электронных кандидатов в отобранных событиях. Среди отобранных событий была дополнительно изучена группа событий, в которой отсутствовали зарегистрированные адронные струи с поперечным импульсом более 30 ГэВ.

В диссертации подробно проанализированы все процессы СМ, которые дают вклад в отобранные для анализа события, и было оценено ожидаемое количество событий для каждого из этих процессов. Для оценки количества фоновых событий был использован метод контрольных областей фазового пространства, не пересекающихся с пространством отбираемых событий, в которых вкладом сигнальных событий можно пренебречь.

Количество событий, отвечающее процессу образования  $Z$ -бозона с двумя фотонами было найдено в результате вычитания из количества отобранных событий числа оцененных фоновых событий. Хотя оно и превышает ожидаемое число событий от этого процесса в СМ в 2.5 раза, но это превышение не является статистически значимым.

Для определения сечения процесса образования  $Z$ -бозона с двумя фотонами в экспериментальном фазовом пространстве были учтены эффективности отбора экспериментальных событий и интегральная светимость БАК. Значимость сигнала в экспериментальном фазовом

пространстве составила 1.5 стандартных отклонения. При поиске редких процессов обычно принято представлять результаты эксперимента в виде верхнего предела на сечение искомого процесса, если значимость результата меньше 3 стандартных отклонений. Поэтому желательно было бы видеть результаты данного исследования как верхний предел на сечение на уровне достоверности 95%.

Одним из возможных проявлений процессов вне СМ может быть появление аномальных четырехбозонных вершин. В диссертации приведен анализ полученных данных с точки зрения установления пределов на величины этих вершин.

Если для ряда параметров аномального четырехбозонного взаимодействия наиболее строгие ограничения получаются при анализе процессов с образованием W-бозонов, то для констант  $f_{T5}$  и  $f_{T9}$  процесс образования Z-бозона с двумя фотонами позволил установить наиболее жесткие на сегодня ограничения. Следует отметить, что именно мода распада на два нейтрино вносит определяющий вклад установление этих ограничений. Это вызвано тем, что в СМ сечение процесса  $Z(\nu\nu)\gamma\gamma$  значительно меньше, чем для процесса  $Z(l^+l^-)\gamma\gamma$ .

Д.В. Краснопевцев продемонстрировал в диссертации глубокие знания методики физического эксперимента и анализа данных. Все результаты диссертации хорошо обоснованы и достоверны. Их новизна не вызывает сомнений. Исследование работы ТДПИ помогут повысить точность определения импульсов заряженных частиц в установке АТЛАС. Полученные в диссертации наилучшие на сегодня ограничения на параметры аномального взаимодействия четырех нейтральных векторных бозонов могут быть использованы для проверки различных теоретических моделей, предлагаемых для поиска новых процессов за пределами СМ.

Диссертация Краснопевцева Дмитрия Васильевича представляет законченное научное исследование и написана ясным языком. Не обошлось без неудачной терминологии. Например, "недостающая поперечная энергия"

систематически называется "недостающей энергией". Однако эти недостатки не умаляют высокого качества и ценности диссертации.

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

Диссертационная работа Д.В. Краснопевцева «Рождение  $Z_{\mu\mu}$  с последующим распадом  $Z$  на нейтрино и антинейтрино в эксперименте ATLAS и аномальные вершины взаимодействия четырех нейтральных бозонов» полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Краснопевцев Димитрий Васильевич, безусловно **заслуживает** присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 — «Физика высоких энергий».

Доктор физико-математических наук  
начальник лаборатории НИЦ "Курчатовский  
институт" – ИТЭФ

*В.А.С.*

Гаврилов Владимир Борисович  
117218, Москва, ул. Большая Черемушкинская 25  
Тел.: +7 499 125-32-97

E-mail: [Vladimir.Gavrilov@cern.ch](mailto:Vladimir.Gavrilov@cern.ch)

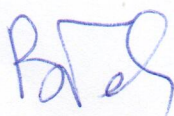
Подпись Гаврилова Владимира Борисовича удостоверяю:  
Ученый секретарь НИЦ "Курчатовский институт" – ИТЭФ  
кандидат физ.-мат. наук Васильев Валерий Васильевич

« 26 » октября 2017 года



Список основных статей (опубликованных за последние 5 лет) официального оппонента Гаврилова Владимира Борисовича по теме диссертационной работы Краснопевцева Дмитрия Васильевича:

1. Search for dark matter produced with an energetic jet or a hadronically decaying W or Z boson as  $\sqrt{s}=13$  TeV/ CMS Collaboration, JHEP 07 (2017) 014.
2. Search for dark matter and unparticles in events with a Z boson and missing transverse momentum in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV/ CMS Collaboration, JHEP 1703 (2017) 061.
3. Search for heavy gauge W' bosons in events with an energetic lepton and large missing transverse momentum at  $\sqrt{s}=13$  TeV/ CMS Collaboration, Phys. Lett. B 770 (2017) 287-301.



Гаврилов Владимир Борисович

« 26 » октября 2017 года