

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Белорусского государственного
университета

А.В.Блохин

«18» января 2026 г.



ОТЗЫВ

оппонирующей организации
Белорусский государственный университет
по диссертационной работе

Терешко Павла Владимировича

«Исследование мягких процессов квантовой хромодинамики и корреляционных явлений в протон-протонных взаимодействиях в эксперименте ATLAS на Большом Адронном Коллайдере», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий

Экспертиза диссертации проводилась в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 17.11.2004 № 560 (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 № 190), и Положения о совете по защите диссертаций, утвержденного постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 22.02.2005 № 19 (в ред. постановления ВАК от 19.08.2022 № 2).

Диссертация Терешко Павла Владимировича выполнена в Государственном научном учреждении «Институт физики имени Б.И.Степанова Национальной академии наук Беларуси» под научным руководством доктора физико-математических наук, доцента Кульчицкого Юрия Александровича.

Описание протон-протонных столкновений на Большом Адронном Коллайдере (БАК) важно для понимания процессов, происходящих в квантовой хромодинамике (КХД) как в рамках Стандартной модели (СМ), так и для исследований новой физики за пределами СМ в экспериментах на БАК.

Представленная на рассмотрение диссертация Терешко П.В. «Исследование мягких процессов квантовой хромодинамики и корреляционных явлений в протон-протонных взаимодействиях в эксперименте ATLAS на Большом Адронном Коллайдере» посвящена исследованиям в вышеуказанной важной области современной науки и технологий. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и

инновационной деятельности на 2021–2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156) по пункту 1: Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства: физика фундаментальных взаимодействий микро- и макромира, зарождающиеся технологии (квантовые, когнитивные, нейроцифровые, антропоморфные).

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа посвящена описанию распределения заряженных частиц в мягких КХД процессах в протон-протонных взаимодействиях в эксперименте ATLAS на БАК. Центральное место занимает изучение распределения множественности заряженных частиц, их двухчастичных Бозе-Эйнштейна корреляций (БЭК), также проведена электромагнитная калибровка железо-сцинтилляционного адронного калориметра установки ATLAS на БАК.

Практическим результатом исследования является электромагнитная калибровка железо-сцинтилляционного адронного калориметра установки ATLAS, которая необходима для получения физических данных. Полученные результаты для распределений заряженных частиц по множественности могут быть использованы при построении теоретических моделей процессов адронизации.

Содержание диссертационной работы и приведенные в ней результаты полностью соответствуют следующим пунктам раздела «Области исследований» паспорта специальности 01.04.23 – физика высоких энергий и отрасли «физико-математические науки»:

1. Исследования по физике сильных взаимодействий на ускорителях.
9. Создание математических методов и систем обработки и анализа экспериментальных ускорительных данных.

2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости

Основной целью диссертационного исследования являлось изучение распределений заряженных частиц в мягких КХД процессах протон-протонных взаимодействий в эксперименте ATLAS на БАК и исследование свойств модулей железо-сцинтилляционного адронного калориметра в пучках электронов. Представленные в диссертации результаты являются новыми и находятся в русле современных мировых направлений исследований в физике высоких и сверхвысоких энергий.

Общее направление исследований диссертационной работы было определено научным руководителем. Задачи ставились научным руководителем. Соискателем были разработаны программные средства для решения поставленных задач, проведен анализ и обработка данных для калибровки

адронного калориметра. Терешко П.В. самостоятельно разработал пакет программ с использованием среды ROOT для первичной обработки данных, анализа и отображения результатов.

Научная и практическая значимость диссертационной работы определяется перспективностью использования полученных результатов для описания процессов протон-протонных столкновений в экспериментах на БАК, других экспериментах в физике высоких энергий и для усовершенствования Монте-Карло моделей КХД.

Публикации автора и само содержание диссертационной работы демонстрируют, что Терешко П.В. внес научный вклад в успешное решение поставленной научной задачи, получил результаты, важные для понимания исследуемых процессов и перспективные для возможного практического использования.

3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Соискателю может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук за получение следующих новых научных результатов:

1. Электромагнитную калибровку адронного калориметра экспериментальной установки ATLAS на БАК, основанной на облучении 11 % модулей калориметра в пучках электронов ускорителя SPS (CERN) с энергией от 10 до 300 ГэВ, которые позволили определить электромагнитную калибровочную константу равную $1,050 \pm 0,003$ пКл/ГэВ.

2. Измерение и описание распределений заряженных частиц, полученных в протон-протонных взаимодействиях с энергией 13 ТэВ в эксперименте ATLAS: распределение событий в зависимости от множественности заряженных частиц, поперечного импульса и псевдобыстроты, которые позволили сравнить экспериментальные данные с предсказаниями ряда Монте-Карло моделей. Показано, что модели EPOS и PYTHIA 8 A2 имеют лучшее описание экспериментальных результатов.

3. Исследования распределений множественности заряженных частиц для протон-протонных взаимодействий при энергиях 0,9, 2,36, 7, 8 и 13 ТэВ на данных эксперимента ATLAS, которые показывают, что при сверхбольших энергиях от 7 до 13 ТэВ распределения нормированной на среднюю величину множественности имеют тенденцию к независимости от энергии, то есть выполняется масштабируемость. Впервые установлено, что масштабируемость выполняется в широкой области по псевдобыстроте $|\eta| < 2,5$ и при множественностях, для которых нормированная средняя множественность больше единицы.

4. Исследования двухчастичных Бозе-Эйнштейн корреляций в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ в эксперименте ATLAS, которые позволили изучить параметры Бозе-Эйнштейн корреляции, характеризующие радиус источника и силу корреляции частиц в расширенной кинематической области в зависимости от множественности заряженных частиц (до 300) и среднего поперечного импульса пары частиц (до 1,5 ГэВ). Впервые получены результаты исследования дважды дифференциальных распределений по множественности заряженных частиц и поперечному импульсу пары частиц. Впервые на большой статистике установлен эффект выполаживания радиуса источника БЭК в зависимости от множественности заряженных частиц в области сверхвысоких множественностей заряженных частиц (от 100 до 300).

4. Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Результаты диссертационной работы могут иметь практическое применение при решении ряда фундаментальных проблем физики элементарных частиц, физики высоких и сверхвысоких энергий. Проведенная электромагнитная калибровка железно-сцинтилляционного адронного калориметра установки ATLAS на БАК использована для адронной калибровки, что необходимо для получения новых физических результатов в эксперименте ATLAS на БАК. Результаты исследований распределений по множественности заряженных частиц и Бозе-Эйнштейн корреляциям могут быть использованы для понимания процессов, происходящих в КХД, и построения теоретических моделей, описывающих процессы адронизации.

5. Замечания и предложения по диссертации

1. При постановке задач не всегда объясняется ее важность и физическое влияние на рассматриваемые процессы. Например, при учете двухчастичных Бозе-Эйнштейн корреляций не приводится оценка, почему исследованы именно двухчастичные БЭК, какой количественный и качественный вклад, по сравнению с двухчастичными, могут внести трехчастичные корреляции и т.д.

2. В диссертационной работе присутствует ряд стилистических ошибок и опусок: например, «позитивно заряженных пучков» вместо «положительно...» (с. 20), «результаты были сравнены» (с. 50), «формуле» (с. 23), нормированная множественность обозначается как буквой z (с. 56 (4.1)), так и буквой m (с. 84). Указанные замечания не влияют на качество и значимость диссертационной работы.

6. Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени, на которую он претендует

Соискателем были разработаны программные средства, проведен анализ и обработка данных для калибровки адронного калориметра. Соискатель самостоятельно разработал пакет программ для первичной обработки данных, анализа и отображения результатов. Применение современных методов исследования, высокий научный уровень диссертационной работы, качественное ее оформление в полном соответствии с требованиями ВАК, новизна полученных результатов, публикации в рецензируемых журналах, теоретическая и практическая значимость полученных результатов дают основание утверждать о соответствии научной квалификации Терешко П.В. ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 14 работах, из которых 6 – статьи в рецензируемых международных журналах, 8 – препринты.

Диссертационная работа Терешко П.В. представляет собой самостоятельно выполненное законченное научное исследование и соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Терешко Павел Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий за:

- электромагнитную калибровку адронного калориметра экспериментальной установки ATLAS на БАК, основанной на облучении 11 % модулей калориметра в пучках электронов ускорителя SPS (CERN) с энергией от 10 до 300 ГэВ, что позволило определить электромагнитную калибровочную константу, равную $1,050 \pm 0,003$ пКл/ГэВ;

- анализ и описание зависимости распределений заряженных частиц, полученных в протон-протонных столкновениях, от множественности, поперечного импульса и псевдобыстроты, что позволило сравнить экспериментальные данные с предсказаниями ряда Монте-Карло моделей;

- выявление закономерности для протон-протонных взаимодействий при энергиях 0,9, 2,36, 7, 8 и 13 ТэВ, показывающей, что при сверхбольших энергиях от 7 до 13 ТэВ распределения нормированной на среднюю величину множественности имеют тенденцию к независимости от энергии.

Отзыв составлен на основании заключения эксперта – Батракова Константина Германовича, кандидата физико-математических наук.

Отзыв обсужден после заслушивания доклада соискателя на расширенном семинаре кафедры теоретической физики и астрофизики и кафедры ядерной физики физического факультета БГУ, проведенном в соответствии с приказом ректора БГУ от 22.01.2026 № 38-ОД, и утвержден открытым голосованием (протокол от 27.01.2026 № 1).

Присутствовали: д.ф.-м.н., проф. Фурс А.Н., заведующий кафедрой теоретической физики и астрофизики (председатель расширенного научного

семинара); к.ф.-м.н., доцент Тимощенко А.И., заведующий кафедрой ядерной физики; к.ф.-м.н., доцент Дежурко М.Д., доцент кафедры ядерной физики; к.ф.-м.н., доцент Батраков К.Г., доцент кафедры ядерной физики (эксперт); д.ф.-м.н., проф. Борздов Г.Н., профессор кафедры теоретической физики и астрофизики; к.ф.-м.н., доцент Жилко В.В., доцент кафедры теоретической физики и астрофизики; к.ф.-м.н., доцент Левко И.А., доцент кафедры ядерной физики; ст. преподаватель кафедры ядерной физики Семенович О.В.; к.ф.-м.н., доцент Дубовская И.Я., доцент кафедры ядерной физики; к.ф.-м.н. Розенбаум В.М., ведущий сотрудник кафедры теоретической физики и астрофизики; к.ф.-м.н., доцент Алейников Д.В., доцент кафедры ядерной физики.

Всего 11 человек, в том числе 2 доктора и 8 кандидатов наук.

В голосовании приняли участие 10 членов расширенного семинара, имеющие ученую степень. Результаты открытого голосования: «За» – 10, «Против» – нет, «Воздержались» – нет.

Постановили:

Рекомендовать к защите диссертацию Терешко Павла Владимировича на тему «Исследование мягких процессов квантовой хромодинамики и корреляционных явлений в протон-протонных взаимодействиях в эксперименте ATLAS на Большом Адронном Коллайдере», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Председатель расширенного научного семинара – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и астрофизики физического факультета БГУ



А.Н.Фурс

Эксперт – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ядерной физики физического факультета БГУ



К.Г.Батраков

Секретарь расширенного научного семинара – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и астрофизики физического факультета БГУ



В.В.Жилко