

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук, профессора, член-корреспондента РАН Долгова Александра Дмитриевича на диссертационную работу Каркарьяна Евгения Карапетовича «Рождение заряженных лептонов в протон-протонных столкновениях на БАК», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

В работе Е.К. Каркарьяна рассматривается рождение лептонов в соударении протонов в рамках Стандартной Модели. Диссертация посвящена выводу аналитических выражений для сечений данных процессов с учетом экспериментальных ограничений коллаборации ATLAS. Основное содержание работы составляет получение формул для квазиупругих процессов, в которых оба протона выживают при взаимодействии, и для неупругих процессов, в которых один из протонов разрушается. Для последнего случая рассматривается вопрос о предположительно существенной величине вклада слабого взаимодействия.

Несмотря на успешное описание большинства известных явлений в физике элементарных частиц в рамках Стандартной Модели, дальнейшая проверка ее предсказаний является весьма актуальной задачей. Отклонения от этих предсказаний могут свидетельствовать о проявлении возможной Новой Физики, исследование которой представляется сейчас крайне интересным. Распространённым методом исследования подобных процессов является Монте-Карло моделирование. Использование независимых аналитических вычислений позволяет избежать ряда упрощений, характерных для генераторов событий, и обеспечивает более глубокое понимание физики процесса. Поэтому развитие подобных теоретических подходов представляется весьма актуальным.

Диссертация Е. К. Каркарьяна состоит из введения, трёх глав и заключения. Общий объём диссертации составляет 94 страницы, включая 9 рисунков и одну таблицу. Список литературы содержит 72 наименования.

Во **введении** приводится обзор работ по теме диссертации, обосновывается актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приводятся сведения о научных публикациях автора и о представлении результатов на конференциях. Также во введении формулируются основные цели и задачи исследования, приводятся положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** решается задача о рождении мюонной пары в ультрапериферическом столкновении протонов. Рассматривается механизм фотон-фотонной аннигиляции в рамках приближения эквивалентных фотонов. Получено аналитическое выражение для сечения данной реакции с учетом экспериментальных ограничений коллаборации ATLAS на фазовый объем конечного состояния. Важным результатом главы является проведение численного интегрирования без использования Монте-Карло симуляций. Также был рассмотрен гипотетический скалярный резонанс X с массой 28 ГэВ, и из сравнения с экспериментальными данными было получено ограничение на взаимодействие с фотонами.

Вторая глава посвящена изучению полужесткого процесса, в котором наряду с упругим имеется неупругий вклад, при котором один из протонов разрушается при взаимодействии. Вначале с новыми экспериментальными ограничениями на фазовый объем коллаборации ATLAS был вычислен упругий вклад. Далее исследование неупругого вклада проводилось в рамках партонной модели. В спиральном представлении получены аналитические выражения для вкладов в сечение от разных поляризационных конфигураций фотонов. Для этого были выведены матрицы плотности для протона с учетом его электрического и магнитного форм-факторов и для кварка, а также квадраты модулей амплитуд, соответствующие определенным спиральным состояниям. В частности, автор показывает, что при аннигиляции фотонов с одинаковыми поперечными поляризациями в мюонную пару, проявляется киральная аномалия: в пределе нулевой массы мюона амплитуда рассеяния не зануляется при рассеянии на угол ноль или π . Итоговое выражение для неупругой части полного сечения было также численно проинтегрировано с теми же экспериментальными ограничениями, что и для упругой части. С учетом "фактора выживания" показано, что полученный результат согласуется с

экспериментально измеренным значением сечения на уровне двух-трех стандартных отклонений.

Третья глава посвящена учету вклада слабого взаимодействия в неупругую часть полуэксклюзивного процесса. Лидирующий вклад этой поправки дается излучением Z бозона из неупруго рассеивающегося протона. Были вычислены матрицы плотности и амплитуды в спиральном представлении с учетом слабого взаимодействия. Вклад дает как интерференция диаграмм процессов через фотон-фотонную аннигиляцию и через аннигиляцию фотона и Z бозона, так и квадрат диаграммы процесса только через аннигиляцию фотона и Z бозона. Было показано, что весь вклад от слабого взаимодействия выделяется в множитель перед только электромагнитным вкладом. Наконец выведено дифференциальное по инвариантной массе мюонной пары сечение с учетом обмена Z . Показано, что при более сильном ограничении снизу на поперечный импульс пары при отборе событий на эксперименте слабая поправка может достигать 20%.

В заключении кратко формулируются основные результаты диссертационного исследования.

Диссертация Е. К. Каркарьяна выполнена на высоком теоретическом уровне. К ее достоинствам прежде всего стоит отнести получение выражений для сечений процессов в аналитическом виде. Приводится подробный вывод необходимых выражений для амплитуд, матриц плотности и сечений, опираясь на проверенный аппарат квантовой теории поля и диаграммной техники Фейнмана. Стоит отметить с положительной стороны, что в диссертации обосновываются применяемые приближения и обсуждаются неопределенности величин, входящих в выражение для сечения. Автор стремится к наиболее полному теоретическому описанию рассматриваемого процесса. Весьма интересным результатом является оценка вклада слабой поправки на уровне 20% при нижнем ограничении на поперечный импульс пары на масштабе электрослабой шкалы. На таком уровне данный вклад может быть замечен и проверен экспериментально, что делает полученный результат высоко значимым как для теории, так и для эксперимента.

Работа является глубоким и прекрасно обоснованным теоретическим исследованием.

Замечаний по существу результатов, полученных в диссертации у меня нет. Однако для более глубокого проникновения в суть теоретических вычислений было бы желательно, если бы автор привел интуитивный качественный анализ расчетов, позволяющий лучше понять величину обсуждаемых эффектов.

Приведенные замечания не влияют на общую высокую оценку полученных результатов и уровня представленной диссертации. Достоверность и обоснованность научных положений, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений и обуславливается строгостью методов теоретической физики, применяемых в работе. Новизна и значимость полученных результатов подтверждается их публикацией в 7 научных статьях в ведущих российских и зарубежных научных журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты, представленные в диссертации, были апробированы на нескольких крупных профильных научных конференциях.

Текст диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК, а автореферат корректно отражает основное содержание и результаты диссертационного исследования.

Диссертация Каркарьяна Евгения Карапетовича «Рождение заряженных лептонов в протон-протонных столкновениях на БАК» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Каркарьян Евгений Карапетович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — теоретическая физика.

Отзыв составил:

Долгов Александр Дмитриевич,

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий ЛКФЭЧ ФФ НГУ.

Долгов Александр Дмитриевич

19 марта, 2026

Адрес: Новосибирск 90, ул, Пирогова, 2, Физфак НГУ.

Телефон: +7 913 795 12 53

Электронная почта: aldrdm@gmail.com.

Подпись заведующего ЛКФЭЧ, доктора физико-математических наук, профессора, член-корреспондента РАН Долгова Александра Дмитриевича заверяю

Подпись Долгова АД заверяю
Специалист Управления кадров НГУ

«19» марта 2026 г.

Список работ по официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора, член-корреспондента РАН, А.Д. Долгова по тематике диссертации Е.К. Каркарьяна "Рождение заряженных лептонов в протон-протонных столкновениях на БАК" в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. E.V. Arbuzova, A.D. Dolgov, A.A. Nikitenko, "Cosmic rays from annihilation of heavy dark matter particles", *Nucl.Phys.B* 1010 (2025) 116754, arXive [2405.12560](https://arxiv.org/abs/2405.12560) [hep-ph].
2. A.D. Dolgov, "Primordial Black Holes, Dark Matter, and Anti-Matter," *Phys.Part.Nucl.* 56 (2025) 3, 618-624.
3. A.D. Dolgov, "Black Dark Matter and Antimatter", *Phys.Part.Nucl.* 55 (2024) 6, 1474-1480.
4. E.V. Arbuzova, K.A. Dolgikh, A.D. Dolgov et al, Opening of New Windows to the Early Universe by Means of Multi-Messenger Astronomy (Brief Review), *JETP Lett.* 119 (2024) 7, 485-494.
5. A.D. Dolgov, "Primordial Black Holes, Early Galaxies, and Antimatter in the Milky Way", *Phys.Atom.Nucl.* 86 (2023) 4, 562-576.
6. A.D. Dolgov, A.S. Rudenko, "Conversion of Protons to Positrons by a Black Hole", *Phys.Part.Nucl.Lett.* 21 (2024) 4, 865-872.
7. A.D. Dolgov, "Anti-stars in the Milky Way and primordial black holes", *Nuovo Cim.C* 46 (2022)
8. E.V. Arbuzova, A.D. Dolgov, A.S. Rudenko, "Calculations of Scalaron Decay Probabilities", *Phys.Atom.Nucl.* 86 (2023) 3, 266-276, [2112.11288](https://arxiv.org/abs/2112.11288) [hep-ph].
9. Elena Arbuzova, Alexander Dolgov, Rajnish Singh, R^2 - Cosmology and New Windows for Superheavy Dark Matter, *Symmetry* 13 (2021) 5, 877. 10.

10. E.V. Arbuzova, A.D. Dolgov, L.A. Panasenko, "On Graviton Propagation in Curved Space-Time Background", *J.Exp.Theor.Phys.* 135 (2022) 3, 304-311.