

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки «Институт теоретической физики  
имени Л.Д. Ландау Российской академии наук».

член-корреспондент РАН Колоколов И.В.

8 апреля 2026 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теоретической физики имени Л.Д. Ландау Российской академии наук»  
о диссертационной работе Каркарьяна Евгения Карапетовича  
«Рождение заряженных лептонов в протон-протонных столкновениях на БАК»,  
представленной на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.3. Теоретическая физика

Диссертационная работа Каркарьяна Евгения Карапетовича выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук и посвящена в **высшей степени актуальным** поискам физики вне Стандартной Модели (СМ).

Несмотря на успехи унификации электромагнетизма со слабыми взаимодействиями, увенчавшейся триумфальным наблюдением на опыте хиггсовского бозона с массой близкой к ожидавшейся согласно ряду предсказаний теоретиков на основе Стандартной Модели, её несовершенство следует считать установленным фактом. Именно, к фундаментальным проблемам вне Стандартной Модели вкуче со стандартной космологией Большого взрыва относятся механизм инфляции, до сих пор неясное происхождение бариогенезиса, происхождение темной материи. Загадкой остаются наблюдаемая иерархия масс лептонов и кварков, величины углы смешивания в матрице Кобаяши-Маскавы для кварков и её аналоге для нейтрино, масштаб нарушения CP-симметрии в слабых взаимодействиях и отсутствие CP-несохранения в квантовой хромодинамике. Поэтому тезис диссертанта «на данный момент Стандартная Модель является наиболее точной и **всеобъемлющей** теорией взаимодействия элементарных частиц» нельзя воспринимать буквально. Впрочем, собственно сама диссертационная работа Евгения Карапетовича есть антитеза этому тезису.

Общая постановка задачи обсуждена во **Введении**. В своей работе диссертант следует стратегии поиска отклонений от количественных предсказаний СМ для конкретных процессов, изучаемых на Большом Адронном Коллайдере (БАК). Важно то, что на БАК реализуема работа в режиме  $\gamma\gamma$  и  $\gamma Z$  коллайдера. Именно это стимулировало диссертанта в выборе в качестве объекта исследований процессов рождения мюонных пар. Здесь особо интересны ультрапериферические квазиупругие взаимодействия без возбуждения протонов и с рождением мюонных пар, которые в существенной степени свободны от

адронного фона. Именно чистота конечного состояния делает такие процессы особо чувствительными к возможному образованию частиц темной материи в столкновениях фотонов. Наряду с полностью квазиупругими процессами, в диссертации изучены также полужексклюзивные процессы с инклюзивным суммированием многочастичных возбуждений одного из сталкивающихся протонов.

Начиная с GEANT, были развиты многочисленные монте-карловские алгоритмы моделирования конечных состояний в неупругих процессах при высокой энергии. Они все в разной степени не свободны от модельных предположений, особенно в моделировании поляризационных наблюдаемых. Именно поэтому золотым стандартом остаются аналитические расчеты, позволяющие надежный контроль корреляций между разными наблюдаемыми. Отрадно, что Е.К. Каркарьян в своей диссертации развивает именно надежный и однозначный аналитический подход, прибегая к численным методам только на последней стадии.

**Глава 1** посвящена квазиупругому двухфотонному процессу  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-$ . Получено аналитическое выражение для дифференциального сечения процесса, позволяющее естественным образом наложить экспериментальные ограничения, и в логарифмическом приближении провести полное аналитическое интегрирование. Показано, что поправки на зарядовый формфактор протона и фактор выживания не превышают несколько процентов. Досадно, что диссертант использует давно устарелое дипольное приближение для формфактора. Согласие с экспериментом ATLAS хорошее. Получено аналитическое выражение для сечения  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-p$  через промежуточный резонанс  $\gamma\gamma \rightarrow X \rightarrow \mu^+\mu^-$  и дано ограничение на ширину распада  $X \rightarrow \gamma\gamma$ .

В **Главе 2** дана теория полужексклюзивного процесса  $pp \rightarrow p\mu^+\mu^-X$  с инклюзивным возбуждением одного из протонов. Здесь автор привлекает партонный подход с фундаментальным подпроцессом  $p(\gamma\gamma)q \rightarrow p\mu^+\mu^-q$  и проводит детальный анализ поляризации виртуальных фотонов и спиновых свойств рождения мюонной пары в особо удобном для данной задачи спиральном формализме. Вклад непертурбативных виртуальностей промежуточного фотона в инклюзивное возбуждение протона численно заметен, но не влияет на достаточно удовлетворительное согласие с данными эксперимента ATLAS.

В **Главе 3** впервые рассмотрена поправка к полужексклюзивному процессу  $p(\gamma\gamma)p \rightarrow p\mu^+\mu^-X$  от слабого взаимодействия в режиме  $\gamma Z$  коллайдера. Учтены критерии отбора, принятые в экспериментах ATLAS. Показано, что главный вклад в сечение дают  $Z$ -бозоны из вершины возбуждения протона. Найдено, что поправка на слабое взаимодействие растет с ростом поперечного импульса мюонной пары и достигает 20 %.

#### **Критические замечания из текста отзыва:**

1. Характеристика Стандартной Модели как всеобъемлющей все же преувеличение.
2. Использованное автором дипольное приближение для электромагнитного формфактора протона устарело уже 20 лет тому назад. Правда, поправка к изучаемым сечениям на формфактор численно мала и не влияет на главные выводы диссертации.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и не снижают ее научной ценности. Диссертационная работа Евгения Карапетовича Каркарьяна является

самостоятельным оригинальным научным исследованием, достоверность и новизна результатов и обоснованность выводов которого не вызывают сомнений. Достоверность результатов основывается как на надежности использованных теоретических методов, так и на согласии численных результатов диссертанта с экспериментальными данными, полученными коллаборацией ATLAS на Большом Адронном Коллайдере. Материалы диссертации докладывались на многочисленных конференциях и опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, включая журналы квартиля Q1 из списков Web of Science и Scopus. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Доклад Е.К. Каркарьяна по диссертационной работе был заслушан и обсужден на семинаре Ученого Совета ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН 27 февраля 2026 г. Отзыв на диссертационную работу Е.К. Каркарьяна одобрен Ученым Советом ИТФ им.Л.Д. Ландау РАН, протокол № 16 от 3 апреля 2026 г.

Диссертационная работы Е.К. Каркарьяна «**Рождение заряженных лептонов в протон-протонных столкновениях на БАК**» полностью удовлетворяет по своим результатам всем критериям, предъявляемым к кандидатской диссертации в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней ФИАН им. П.Н. Лебедева, а её автор Евгений Карапетович Каркарьян достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Отзыв составлен главным научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук, доктор физ.-мат. наук

  
-----/ Николаев Н.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им.Л.Д.Ландау Российской академии наук, Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, проспект Академика Семенова, д. 1а, тел 8(195)7029317, факс. 8(495)7029317, <http://www.itp.ac.ru>, e-mail: [office@itp.ac.ru](mailto:office@itp.ac.ru)

Подпись д.ф.-м.н., г.н.с. ИТФ им.Л.Д. Ландау РАН, Н.Н. Николаева удостоверяю.

И.о. Ученого секретаря ИТФ им. Л.Д. Ландау, д.ф.-м.н.

  
--/ С.В. Аксёнов /

## Список публикаций сотрудников ведущей организации по теме диссертации

1. B.G. Zakharov (Landau Inst.), «Jet Quenching in Mini-Quark–Gluon Plasma: Medium Modification Factor  $I_{S_{\{pA\}}}$  for Photon-Tagged Jets», Published in: JETP Lett. 118 (2023) 1, 1-7, Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz. 118 (2023) 1, 3-4, e-Print: 2305.19989 [hep-ph]
2. B.G. Zakharov (Landau Inst.), «Medium effects for hadron-tagged jets in proton-proton collisions», Published in: Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz. 116 (2022) 6, 341-342, JETP Lett. 116 (2022) 6, 347-352, JETP Lett. 116 (2022) 11, 852 (erratum), e-Print: 2208.10339 [hep-ph].
3. B.G. Zakharov (Landau Inst.), «Radiative  $p_{\perp}$ -broadening of fast partons in an expanding quark–gluon plasma», Published in: Eur.Phys.J.C 81 (2021) 1, 57, e-Print: 2003.10182 [hep-ph].
4. B.G. Zakharov (Landau Inst.), «Updated analysis of jet quenching at RHIC and LHC within the light cone path integral approach», Published in: J.Phys.G 48 (2021) 5, 055009, e-Print: 2007.09772 [hep-ph].
5. B.G. Zakharov (Landau Inst.), «Nuclear Modification Factor  $I_{S_{\{AA\}}}$  in AA Collisions at RHIC and LHC Energies in Scenarios with and without Quark–Gluon Plasma Formation in pp Collisions», Published in: JETP Lett. 122 (2025) 5, 269-275, e-Print: 2508.02623 [hep-ph]
6. B.G. Zakharov (Landau Inst.), «Predictions for RAA in 5.36 TeV C + C, O + O, and Ne + Ne collisions at the LHC», Published in: Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz. 122 (2025) 8, 437-438, JETP Lett. 122 (2025) 8, 457-464, e-Print: 2509.07741 [hep-ph]
7. M.A. Nefedov (Samara State U.), N.N. Nikolaev (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst.), V.A. Saleev (Hamburg U., Inst. Theor. Phys. II and Samara State U.), «Drell-Yan lepton pair production at high energies in the Parton Reggeization Approach», Published in: Phys.Rev.D 87 (2013) 1, 014022, e-Print: 1211.5539 [hep-ph].
8. E. Bartos (Bratislava, Inst. Phys.), S.R. Gevorkian (Dubna, JINR), E.A. Kuraev (Dubna, JINR), N.N. Nikolaev (Landau Inst.), «Multiphoton exchanges in peripheral heavy ion collisions», Published in: Acta Phys.Polon.B 38 (2007), 987-992.
9. E. Bartos, S.R. Gevorkyan, E.A. Kuraev, N.N. Nikolaev, «Multiphoton exchanges in pair production processes in heavy ion collisions», Published in: Acta Phys.Slov. 55 (2005) 1, 1.
10. E. Bartos (Dubna, JINR), S.R. Gevorkyan (Dubna, JINR), E.A. Kuraev (Dubna, JINR), N.N. Nikolaev (Landau Inst.), «Multiple exchanges in lepton pair production in high-energy heavy ion collisions», Published in: J.Exp.Theor.Phys. 100 (2005) 4, 645-655, Zh.Eksp.Teor.Fiz. 127 (2005) 4, 732-743, e-Print: hep-ph/0410263 [hep-ph].
11. S.R. Gevorkyan (Dubna, JINR and Yerevan Phys. Inst.), I.P. Ivanov (Julich, Forschungszentrum and Sobolev IM, Novosibirsk), N.N. Nikolaev (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst.), «Ultraperipheral photoproduction of vector mesons in the nuclear Coulomb field and the size of neutral vector mesons», Published in: NATO Sci.Ser.II 111 (2003), 253, e-Print: hep-ph/0305054 [hep-ph].
12. E. Bartos (Dubna, JINR and Comenius U.), S.R. Gevorkyan (Dubna, JINR and Yerevan Phys. Inst.), E.A. Kuraev (Dubna, JINR), Nikolai N. Nikolaev (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst.), «Multiple lepton pair production in relativistic ion collisions», Published in: Phys.Lett.B 538 (2002), 45-51, e-Print: hep-ph/0204327 [hep-ph]
13. E. Bartos (Dubna, JINR and Comenius U.), S.R. Gevorkyan (Dubna, JINR and Yerevan Phys. Inst.), E.A. Kuraev (Dubna, JINR), Nikolai N. Nikolaev (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst.), «The Lepton pair production in heavy ion collisions revisited», Published in: Phys.Rev.A 66 (2002), 042720, e-Print: hep-ph/0109281 [hep-ph]

14. M. Anselmino (Turin U. and INFN, Turin), V. Barone (Piemonte Orientale U., Alessandria and INFN, Turin), A. Drago (Ferrara U. and INFN, Ferrara), N.N. Nikolaev (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst.), «Accessing transversity via  $J/\psi$  production in polarized  $p$  vector anti- $p$  vector interactions», Published in: Phys.Lett.B 594 (2004), 97-104, e-Print: hep-ph/0403114 [hep-ph].
15. N.N. Nikolaev (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst.), W. Schafer (Warsaw, CFT), « 12. Quenching of Leading Jets and Particles: The  $p$  perp Dependent Landau-Pomeranchuk-Migdal effect from Nonlinear  $k$  perp Factorization», Published in: Phys.Rev.D 74 (2006), 014023, e-Print: hep-ph/0604117 [hep-ph].
16. Nikolai N. Nikolaev (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst.), J. Speth (Julich, Forschungszentrum), V.R. Zoller (Moscow, ITEP), « 14. Predictions for high-energy real and virtual photon-photon scattering from color dipole BFKL-Regge factorization», Published in: Eur.Phys.J.C 22 (2002), 637-646, e-Print: hep-ph/0001120 [hep-ph].
17. Nikolai N. Nikolaev (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst. and Moscow, ITEP), J. Speth (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst. and Moscow, ITEP), V.R. Zoller (Julich, Forschungszentrum and Landau Inst. and Moscow, ITEP), « Color dipole BFKL-Regge factorization and high-energy photon photon scattering», Published in: J.Exp.Theor.Phys. 93 (2001) 5, 957-968, Zh.Eksp.Teor.Fiz. 120 (2001) 5, 1104-1116, DOI: 10.1134/1.1427107