

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Дубинина Михаила Николаевича
на диссертацию Каркарьяна Евгения Карапетовича
«Рождение заряженных лептонов в протон-протонных столкновениях на БАК»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по научной специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Диссертация Каркарьяна Евгения Карапетовича посвящена актуальной теме – исследованию рождения мюонов в периферических столкновениях протонов на Большом Адронном Коллайдере (БАК). Как известно, сравнительно высокая эффективность регистрации мюонов при отделении различных сигналов от фоновых процессов привлекала внимание в течение последних десяти лет в основном в связи регистрацией распадов мезонов, содержащих с- и b- кварки в интервале псевдобыстроты $y \sim 2 - 3$ не только в pp-взаимодействиях, но также и при взаимодействиях тяжелых ионов. Основной интерес в связи с процессами такого типа был связан с проверками вычислений квантовой хромодинамики при больших различиях долей импульса партонов в начальном состоянии. Рассматриваемый в диссертации тип эксклюзивных и полуэксклюзивных периферических процессов весьма отличается от традиционных типов моделирования для лептонов, возникающих после распадов, и представляет существенный интерес в связи с исследованиями как стандартных фонов, так и сигналов новой физики на различных типах коллайдеров. В этой связи отметим моделирование последнего времени для фонов к нестандартным димюонным сигналам коллаборации CMS, фонов к «невидимым» модам распада бозона Хиггса в $\mu^+\mu^-$ столкновениях и других. Таким образом, диссертация представляет собой оригинальное исследование, отличающееся новизной и представляющее несомненную ценность для отделения периферических типов фоновых процессов при реконструкции возможных сигналов новой физики.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации - 94 страницы, включая 9 рисунков и одну таблицу.

Во **введении** приводится обзор литературы по теме диссертации, обосновывается актуальность исследования, его новизна и формулируются цели и задачи. Представлены выносимые на защиту положения и обоснованы научная новизна и значимость работы. Приведена информация об апробации работы и список публикаций автора по теме.

Автор отмечает, что стандартные пакеты моделирования, такие как PYTHIA 8 и основанные на других стандартных пакетах программ для БАК генераторы событий им не используются, упоминая в этой связи разработанную для целей диссертации оригинальную библиотеку LIBERA. Как известно, точное вычисление полных сечений для мультипериферических диаграмм уже в случае простейших процессов, таких как $e+e^- \rightarrow e+e^-e+e^-$ с фотонами в t -канале, должно проводиться с полным контролем сокращения двойных полюсов $\sim t^{-2}$ в квадрате амплитуды, обусловленным $U(1)$ калибровочной инвариантностью. Отсутствие сокращения двойных полюсов приводит к неприемлемому росту полного сечения как энергия пучков в четвертой степени. По этой причине использование автором приближения эквивалентных фотонов (бозонов) оправдано.

Глава 1 посвящена рождению лептонов в так называемых ультрапериферических (характерные переданные импульсы порядка 1 ГэВ) столкновениях протонов через обмен фотонами в t -канале. Протоны не разрушаются («выживают»). Описывается модифицированный метод эквивалентных фотонов, с помощью которого выводится основное аналитическое выражение для сечения рассеяния в исследуемом классе процессов. Анализируются экспериментальные ограничения коллаборации ATLAS, которые необходимо наложить на фазовый объем конечных частиц для выделения сигнала, приводится аналитическая формула для сечения с учетом этих ограничений. Далее получены аналитические выражения для сечения рождения мюонов в ультрапериферическом столкновении протонов через обмен фотонами с учетом электрического форм-фактора протона и так называемого «фактора выживания». Полученные результаты позволяют установить ограничения на константу взаимодействия гипотетического скалярного резонанса с массой 28 ГэВ, распадающегося на димюонную пару, с фотонами. Интерес к таким ограничениям в пространствах параметров различных моделей теории поля связан с наблюдением нестандартных димюонных сигналов в течение последних лет коллаборацией CMS БАК.

В **Главе 2** рассматривается рождение мюонов посредством электромагнитного взаимодействия в столкновении протонов для инклюзивного процесса, когда один из протонов разрушается и в конечном состоянии образуется набор адронов. Обсуждается кинематика процесса с учетом экспериментальных ограничений коллаборации ATLAS на фазовый объем, и обосновываются используемые в дальнейшем анализе приближения. При помощи метода спиральных амплитуд получены выражения для матрицы плотности фотонов, испускаемых выжившим в столкновении протоном и кварком внутри протона, разрушенного в столкновении. Также в этом же представлении получена амплитуда полного процесса лепторождения в протон-кварковом рассеянии через обмен фотонами. При выводе аналитического выражения учитываются как электрический, так и магнитный форм-факторы выжившего протона. Показано, что в амплитуде проявляется аксиальная аномалия, отвечающая одинаковым спиральностям фотонов,. Приводится аналитическое выражение для полного сечения процесса рождения мюонной пары в протон-протонном столкновении для канала фотон-фотонного слияния, просуммированное по всевозможным кварковым ароматам. Показано, что проинтегрированное в области фазового объема, соответствующего экспериментальным измерениям, сечение данного процесса в сумме с квазиупругим вкладом в той же области находится в согласии с экспериментальным значением сечения коллаборации ATLAS при учёте “фактора выживания”.

Глава 3 посвящена учету поправки от слабого взаимодействия за счёт обмена одиночным Z бозоном к неупругой части сечения рождения мюонной пары в рассеянии протонов через фотон-фотонное слияние. Выводятся модифицированные выражения для матриц плотности, учитывающие слабое взаимодействие между кварком и Z-бозоном. Доказано, что квадрат интерференционной части амплитуды между векторной и аксиально-векторной частью обращается в нуль и квадрат амплитуды аксиально-векторной части совпадает с квадратом векторной части сечения с точностью до фактора, полученного в пределе большой инвариантной массы мюонной пары. Таким образом установлено свойство факторизации вкладов взаимодействий, когда квадрат модуля амплитуды рассматриваемого неупругого процесса с учетом слабой поправки равен квадрату модуля амплитуды процесса, идущего только через электромагнитное взаимодействие, умноженному на фактор, зависящий от квадрата виртуальности промежуточного Z бозона. Далее показано, что вклад от слабого взаимодействия в полное сечение неупругого процесса может быть значительным относительно лидирующего электромагнитного вклада при ограничении на поперечный импульс на уровне электрослабого масштаба.

В заключении формулируются основные результаты диссертации.

Подводя итоги, заключаем, что в диссертации Каркарьяна Е.К. получены новые аналитические выражения для эксклюзивных и полуинклюзивных периферических процессов рождения лептонов в процессах фотон-фотонного слияния для протон-протонных столкновений. Прямым численным интегрированием получены значения сечений процессов, которые могут быть использованы для конкретных экспериментов, не прибегая к стандартным пакетам программ Монте Карло моделирования процессов на коллайдерах. Полученные результаты имеют высокую степень достоверности, отличаются достаточной степенью общности для применения к исследованию аналогичных периферических процессов в экспериментах на других типах коллайдеров. Выполненный автором детальный теоретический анализ эффектов слабого взаимодействия для исследуемого класса процессов показывает, что соответствующие дополнительные вклады могут достигать по величине 20%, что находится в пределах экспериментальных возможностей обнаружения.

Выносимые на защиту положения отличаются оригинальностью и новизной, хорошо обоснованы и ясно изложены. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Материалы диссертации опубликованы в 7 статьях в научных журналах и докладывались на международных и всероссийских конференциях.

Основным недостатком диссертации представляется отсутствие сведений об упоминаемой автором библиотеке LIBEPA (ссылка 43 в списке литературы автореферата), которая используется для численного интегрирования с использованием полученных автором аналитических выражений для сечений. Например, упомянутые при использовании полного моделирования детектора ATLAS величины сечений в разделе 2.8 сравниваются с результатами LIBEPA при немотивированном выборе структурных функций базы данных LHAPDF, для которого приводится лишь грубая оценка чувствительности результата к масштабу факторизации PDF.

Указанные замечания не снижают научной ценности полученных результатов. На основании вышеизложенного заключаем, что диссертационная работа “Рождение заряженных лептонов в протон-протонных столкновениях на БАК” подтверждает научную квалификацию Каркарьяна Е.К и полностью удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых

степеней, утверждением постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Каркарьян Евгений Карапетович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

Дубинин Михаил Николаевич
доктор физико-математических наук
и.о. заведующего отделом теоретической
физики высоких энергий института ядерной физики
им.Д.В.Скобельцына МГУ им.М..В.Ломоносова

Подпись М.Н.Дубинина заверяю:
Ученый секретарь НИИЯФ МГУ

9 апреля 2026 г.

Е.А. Сигаева

Список основных публикаций по проблематике оппонируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Дубинин М., Федотова Е., Казаркин Д., Механизм смешивания seesaw type II для темной материи в лево-право симметричной модели. Письма в журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра", т. 22, № 5, с. 966-969 (2025).
2. Boos E., Bunichev V., Dubinin M., et al (CMS Collaboration), Search for dark matter produced in association with a Higgs boson decaying to a tau lepton pair at 13 TeV. Journal of High Energy Physics, Vol. 2025, No. 10, p. 170 (2025).
3. Dubinin M., Kazarkin D., Fedotova E., Nonstandard Types of Mixing and Dark Matter in Models with Heavy Neutral Leptons. Moscow University Physics Bulletin, Vol. 79, p. 408-417 (2024).
4. Dubinin M.N., Kazarkin D.M. Lepton universality in a model with three generations of sterile Majorana neutrinos. Physical Review D, Vol. 109, № 5, 055004 (2024).
5. Dubinin M.N., Kazarkin D.M., Improved cosmological bounds for mixing scenarios of three sterile neutrino generations. J. Exp. Theor. Phys., Vol. 137, p. 814–825 (2023).