

ОТЗЫВ

Официального оппонента Афона Сергея Сергеевича на диссертацию Крюковой Екатерины Андреевны “Гипотетические векторные частицы массой порядка массы лёгких адронов в экспериментах с адронным пучком на фиксированной мишени”, представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – “Теоретическая физика”.

Диссертационная работа Е.А. Крюковой посвящена поиску возможных экспериментальных проявлений тёмного фотона, добавление которого к современной Стандартной Модели физики элементарных частиц является одним из популярных расширений этой модели, приводя к потенциально богатой феноменологии в области гипотетической новой физики. В диссертации проанализированы различные сигнатуры поиска массивного тёмного фотона, приведены подробные оценки чувствительности экспериментов с протонными и пионными пучками к тёмным фотонам, что позволило представить области энергий и параметров этой частицы, к которым будут чувствительны эксперименты.

Актуальность и значимость исследований подтверждается тем, что задача обнаружения новой физики является основным мотивом запуска многих новых экспериментов. А оценка ожидаемых сигналов от новой физики позволяет определить область параметров разных моделей, которую можно исследовать.

Практическая значимость заключается в определении областей параметров моделей, к которым чувствительны современные коллайдерные эксперименты. Результаты работы могут способствовать развитию исследований в моделях с такими параметрами, т.к. в обозримом будущем их можно проверить экспериментально. Работа позволяет уточнить или исключить определённые теоретические модели, что представляет собой важный вклад в развитие физики элементарных частиц.

Диссертация состоит из введения, 3-х глав основного текста, заключения, списка использованных источников и четырёх приложений. Общий объём работы 110 страниц. Диссертация содержит 7 таблиц и 19 рисунков. Список использованных источников включает 166 наименований.

Во введении представлен краткий обзор состояния исследований в области поиска тёмного сектора, описан формализм порталов, введена минимальная модель тёмного фотона и обсуждены основные каналы рождения тёмного фотона массой порядка 1 ГэВ в протон-протонных и пион-протонных столкновениях. В конце сформулированы задачи исследования, обоснована актуальность работы.

В первой главе рассмотрен процесс упругого тормозного излучения протона как потенциального источника тёмных фотонов. Дан краткий обзор существующих оценок сечения тормозного излучения: приближения эквивалентных фотонов Вайцзеккера–Вильямса и результата Блюмляйна и Брюннера. Вводятся формфактор, связанный с гипотезой векторной доминантности, и феноменологический адронный формфактор для промежуточного протона вне массовой поверхности. Проведено вычисление сечения упругого тормозного излучения протона с ненулевой передачей импульса. Представлены численные результаты для типичных масс тёмных фотонов и сравнение их с результатами, полученными в других приближениях. Найдена зависимость полного сечения упругого

тормозного излучения протона от массы тёмного фотона для импульсов пучка протонов, соответствующих ускорителям J-PARC, У-70, Фермилаб и CERN SPS. Также проведено сравнение дифференциального и полного сечений упругого тормозного излучения протона, найденного в диссертации, с результатами, полученными другими авторами.

Во второй главе изучается вклад электромагнитного формфактора Паули в сечение неупругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона. Дан краткий обзор существующих подходов к оценке сечения неупругого тормозного излучения протона. Далее изложены основные аналитические результаты по факторизации сечения неупругого тормозного излучения с учётом протонных электромагнитных формфакторов Дирака и Паули. Найдена главная функция расщепления протона, зависящая от квадратичных комбинаций электромагнитных формфакторов Дирака и Паули и трёх вспомогательных функций расщепления, две из которых связаны с учётом формфактора Паули и, как утверждается, получены впервые. Для импульса протона в пучке 120 ГэВ представлены полные сечения неупругого тормозного излучения протона в зависимости от массы тёмного фотона: приведены как оценки, включающие только вклад формфактора Дирака, так и новый результат с вкладами обоих формфакторов. Далее оценена ожидаемая чувствительность к видимым распадам тёмного фотона ближнего детектора ND280 T2K, многоцелевого детектора DUNE и распадного объёма SHiP. Проведено сравнение с оценками чувствительности, включающими только вклад формфактора Дирака, и показано, что результат данной диссертации значительно расширяет область, доступную для поиска тёмных фотонов.

В третьей главе рассматривается рождение тёмных фотонов в процессе тормозного излучения заряженного пиона. Обсуждается применимость киральной теории к упругому пион-протонному рассеянию при высоких энергиях. В частности, показано, что для пучка пионов с энергией 50 ГэВ, соответствующего эксперименту NA64h, дифференциальное сечение упругого пион-протонного рассеяния, найденное в ведущем порядке киральной теории, находится в противоречии с измерениями Фермилаб. Предложена альтернативная оценка сечения неупругого тормозного излучения пиона с рождением тёмных фотонов массой 0.4–1.2 ГэВ. Вычисление проведено в квазиреальном приближении с исправленной с помощью поправки Доусон суммой по поляризациям тёмного фотона. В результате аналитически получена функция расщепления пиона для испускания тёмного фотона. Численно найдены спектры по энергии рождаемых тёмных фотонов для массы тёмного фотона в диапазоне от 0.4 до 1.8 ГэВ и для энергии пучка пионов 50 ГэВ. Их интересной особенностью является значительный вклад тёмных фотонов высоких энергий, продукты распада которых легче обнаружить. Также рассмотрено неупругое тормозное излучение вторичных пионов, рождаемых на мишени в экспериментах T2K, DUNE и SHiP. Численно найдена зависимость средней энергии тёмного фотона от его массы. Приведены численные оценки сечения процесса Дрелла–Яна в ведущем и следующем за ведущим порядках теории возмущений по константе сильного взаимодействия, выполненные с помощью библиотеки LHAPDF. Для масс тёмного фотона от 1.5 ГэВ до 3.5 ГэВ найдены энергетические спектры тёмных фотонов, рождаемых в аналоге процесса Дрелла–Яна для пучка пионов с энергией 50 ГэВ. Для аналога процесса Дрелла–Яна с участием вторичных пионов от столкновений пучка протонов с мишенью в экспериментах T2K, DUNE и SHiP найдена зависимость средней энергии тёмного фотона от его массы. Проведено сравнение полных сечений рождения тёмного фотона в пион-протонных столкновениях при энергии пучка 50 ГэВ для процесса неупругого тормозного излучения пиона (даёт основной вклад

для тёмных фотонов с массой 0.4–1.2 ГэВ) и аналога процесса Дрелла–Яна (то же для тёмных фотонов с массой 1.2–3.5 ГэВ).

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Вспомогательный материал вынесен в **четыре приложения**.

По представленной работе можно сделать следующие **замечания и комментарии**.

1) На Рис. 1 показан результат расчёта дифференциального потока гипотетических бозонов при тормозном излучении протона в приближении эквивалентных фотонов. Возникает вопрос: почему средний поперечный импульс фотона там положен 0.1 ГэВ, что в разы меньше приведённой в этой же диссертации оценки (190)?

2) В заключении отмечено, что в первой главе была показана применимость приближения Вайцзеккера–Вильямса к протонным пучкам с точностью 3–9%. Ожидаемые эффекты новой физики обычно на несколько порядков меньше этой точности. Казалось бы, данное приближение выглядит слишком грубым для улавливания сигнатур от новой физики. Как можно оправдать его использование?

3) Существование выраженного колена, показанного на графиках 4b и 6b, возникло из-за учёта в формфакторе (10) резонанса $\rho(1250)$, который указан в Таблице 1, однако отсутствует в PDG даже в списке недостаточно подтверждённых состояний – имели место лишь редкие сообщения о наблюдении этого резонанса, которые не подтвердились. Для следующего резонанса, $\rho(1450)$, в Таблице 1 не правильно указана ширина, однако это не влияет на результаты, поскольку вкладом этого резонанса можно смело пренебречь практически для всех наблюдаемых, вычисляемых с использованием гипотезы векторной доминантности. С другой стороны, как показывает современная феноменология, в составе релятивистского протона есть заметный вклад от s-кварка, на уровне 5%. Поэтому, на мой взгляд, было бы разумным его учесть в формфакторе (10) в виде вклада от ρ -мезона. Хотя ожидаемая константа связи с ρ (связанная с вычетом в полюсном вкладе) на порядок меньше, чем в случае ρ -мезона, это может сильно компенсироваться тем, что ρ -мезон почти на два порядка шире, чем ρ , то есть ρ даёт более выраженный узкий пик. Стоит отметить, что при анализе неупругого тормозного излучения протона в Главе 2, вклад от ρ -мезона присутствует на Рис. 9.

4) В параграфе 2.2 обсуждаются плюсы и минусы нескольких имеющихся в литературе оценок для электромагнитных формфакторов протона в нефизической области. Складывается ощущение неполноты обсуждения, поскольку в литературе имеются и другие фиты для времениподобной области. Например, что мешает взять фит из работы arXiv:2012.14656 [hep-ph] и продолжить в нефизическую область?

5) В Главе 3 не упомянут возможный вклад скалярного сигма-мезона (обозначаемого как $f_0(500)$ в современной PDG) в t-канале – аналога диаграммы 11b. В феноменологии низкоэнергетических адронных взаимодействий он часто играет большую роль, в частности, он, как известно, вносит доминирующий вклад в величину ”глубины” потенциала межунонного взаимодействия при моделировании этого потенциала суммой юкавских взаимодействий от обмена лёгкими мезонами. Он же даёт массу нуклону в линейной сигма-модели. Учёт сигма-мезона, по-видимому, является удачной параметризацией эффектов от многопионных обменов. В современной киральной теории возмущений обмен сигма-мезоном, в определённом смысле, заменяется контактным взаимодействием, показанным на диаграмме 11c. Это соответствует пределу очень тяжёлого сигма-мезона или нулевого t (стягивание в точку скалярного пропагатора). Тем не менее, на мой взгляд, было бы интересно включить сигма-мезон явно – заменить 11c на

диаграмму типа 11b со скалярным мезоном вместо фотона. Константы в вершинах для сигма-мезона известны из феноменологии. Не исключаю, что это может поменять сделанный в Главе 3 вывод о том, что t-каналом можно пренебречь.

б) Вызывает некоторое удивление использование в Главе 3 фита (190) для среднего поперечного импульса тёмного фотона – фит взят из старой работы [166] 1982-го года, точно ли нет более свежих данных? Также в (190) нет оценки ожидаемой погрешности.

Отмеченные недостатки имеют субъективный характер и не меняют в целом весьма **положительной оценки** диссертационной работы Е.А. Крюковой. Видно, что проделан огромный труд как в плане аналитики и численных расчётов, так и в изучении многочисленной литературы по тематике диссертации. Полученный опыт и приобретённые навыки могут быть востребованы для аналогичного анализа других экспериментов по поиску тёмного сектора, что делает диссертанта ценным специалистом в данной актуальной области исследований. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и отвечает требованиям ВАК. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Результаты, полученные автором, являются новыми. Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, весьма высокая, поскольку в работе использовались хорошо известные методы квантовой теории поля, согласованность полученных результатов с результатами других авторов в определённых пределах и проверенные пакеты вычислительных программ. Достоверность, обоснованность и новизна результатов также подтверждаются их успешной апробацией в виде докладов на международных и российских конференциях и семинарах. Всего по теме диссертации опубликовано 4 работы, все в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК. **Аннотация правильно и полно отражает** содержание диссертации.

Диссертация Е.А. Крюковой “Гипотетические векторные частицы массой порядка массы лёгких адронов в экспериментах с адронным пучком на фиксированной мишени” удовлетворяет всем критериям “Положения о присуждении учёных степеней”, утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – Теоретическая физика.

01.09.2026

Официальный оппонент

Доктор физ.-мат. наук, профессор

Кафедры физики высоких энергий и элементарных частиц

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет»

С.С. Афонин

s.afonin@spbu.ru,

+79111394723

199034, Санкт-Петербург,

Университетская наб., д. 7–9

«Санкт-Петербургский

государственный университет»

Подпись С.С. Афонина заверяю:

И.о. начальника отдела кадров №3

И.И. Константинова

01.09.2026

Сведения об официальном оппоненте

Афонин Сергей Сергеевич

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика,
тел.+79111394723, адрес электронной почты: s.afonin@spbu.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра физики высоких энергий и
элементарных частиц, профессор.

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных
изданиях за последние 5 лет:

1. S.S. Afonin, “On the hypothesis of a second Higgs boson near 0.5 TeV”, Theoretical and Mathematical Physics, Том 227, № 3, стр. 950-960, 01.06.2026.
2. S.S. Afonin, “A second Higgs near 0.5 TeV from bottom-up holographic modeling of beyond the Standard Model strong sector”, Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics, Том 840, 137882, 01.05.2023.
3. S.S. Afonin, “W-Boson Mass Anomaly as a Manifestation of Spontaneously Broken Additional SU(2) Global Symmetry on a New Fundamental Scale”, Universe, Том 8, № 12, 627, 28.11.2022.
4. S.S. Afonin, “Ultraviolet regularization of energy of two static sources in the bottom-up holographic approach to strong interactions”, Theoretical and Mathematical Physics, Том 216, № 3, стр. 1278-1286, 01.09.2023.
5. S.S. Afonin, T.D. Solomko, “On incorporation of heavy-quark mass into soft-wall holographic models”, International Journal of Modern Physics A, Том 38, № 22-23, 2350122, 17.09.2023.
6. S.S. Afonin, T.D. Solomko, “Low and High Energy Constraints in AdS/QCD Models”, Physics of Particles and Nuclei, Том 53, № 2, стр. 387–392, 01.04.2022.
7. S.S. Afonin, T.D. Solomko, “Towards a theory of bottom-up holographic models for linear Regge trajectories of light mesons”, European Physical Journal C, Том 82, № 3, 195, 01.03.2022.