

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **01.10.2026 г. № 47/9**

О присуждении **Крюковой Екатерине Андреевне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Гипотетические векторные частицы массой порядка массы лёгких адронов в экспериментах с адронным пучком на фиксированной мишени» по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика, принята к защите 04.06.2026 г., протокол № 46/8 диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а, приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Крюкова Екатерина Андреевна 1998 года рождения, в 2021 году окончила с отличием магистратуру Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова». В 2025 году соискатель окончила аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по направлению 03.06.01 — Физика и астрономия, по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика. В настоящее время Е.А. Крюкова работает младшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук, отдел теоретической физики. Диссертация выполнена в отделе теоретической физики Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, **Горбунов Дмитрий Сергеевич**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел теоретической физики, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Афонин Сергей Сергеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра физики высоких энергий и элементарных частиц, профессор,

Шевченко Владимир Игоревич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ректор,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация — **Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»** (НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ), г. Гатчина, — в своем положительном заключении, подписанном Семеновой Аллой Николаевной, кандидатом физико-математических наук, заведующей сектором квантовой теории поля отделения теоретической физики, и Саранцевым Андреем Викторовичем, доктором физико-математических наук, заведующим сектором феноменологии частиц отделения теоретической физики, и утвержденном Ворониным Владимиром Владимировичем, доктором физико-математических наук, заместителем директора по научной работе, указала, что диссертация Е.А. Крюковой соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям и установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, утверждённом Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор

заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика.

Соискатель имеет **10** опубликованных работ, в том числе по теме диссертации **4** работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны при решающем участии соискателя. Автореферат хорошо структурирован, правильно и полно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационного исследования представлены в следующих работах:

1. Gorbunov D., Kriukova E. Dark photon production via elastic proton bremsstrahlung with non-zero momentum transfer // Journal of High Energy Physics. — 2024. — Vol. 2024, no. 1. — P. 58.
2. Gorbunov D., Kriukova E. Pauli form factor contributions to the inelastic proton bremsstrahlung and dark photon production // Journal of High Energy Physics. — 2025. — Vol. 2025, no. 2. — P. 18.
3. Gorbunov D. S., Kriukova E. A. Dark photon production via inelastic proton bremsstrahlung with Pauli form factor // Physics of Particles and Nuclei. — 2025. — Vol. 56, no. 2. — P. 506–510.
4. Gorbunov D., Kriukova E. Pion bremsstrahlung in the splitting function formalism and the dark photon production // Journal of High Energy Physics. — 2026. — Vol. 2026, no. 3. — P. 192.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что работа отличается ясностью изложения и высоким научным уровнем, полученные автором результаты — новые, достоверные и обоснованные, а диссертация представляет собой завершённое научное исследование и является добротной и качественно оформленной работой. Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям и установленным Положением о порядке

присуждения учёных степеней, утверждённом Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

В отзывах оппонентов и ведущей организации были высказаны следующие критические замечания и пожелания:

1. На Рис. 1 показан результат расчёта дифференциального потока гипотетических бозонов при тормозном излучении протона в приближении эквивалентных фотонов. Из диссертации не ясно, 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 Вайцеккера–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. Из диссертации не ясно, 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 неправильно 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, было бы разумным его учесть в формфакторе (10) в виде вклада от ϕ -мезона. Хотя ожидаемая константа связи с ϕ (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 ϕ , то есть ϕ 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, в диссертации не обсуждается фит из работы arXiv:2012.14656 [hep-ph] с возможностью его продолжения 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 межуclidонного 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, 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 исключено, что это может поменять сделанный в Главе 3 вывод о том, что t -каналом можно пренебречь.
6. Вызывает некоторое удивление использование в Главе 3 фита (190) для среднего поперечного импульса тёмного фотона – фит взят из старой работы [166] 1982-го года, и не обсуждается, точно ли нет более свежих данных. Также в (190) нет оценки ожидаемой погрешности.

7. В рассматриваемом сценарии Новой физики имеются два неизвестных (свободных) параметра – масса тёмного фотона и величина кинетического смешивания. Имеется ряд результатов, экспериментально ограничивающих эти величины (например, свежий эксперимент GigaBREAD). Также к делу, вероятно, могут иметь отношение прецизионные тесты КЭД. Хотя эти эксперименты исследуют другие области пространства параметров (соответствующие меньшим характерным массам тёмного фотона), в диссертации не приводятся сведения о том, какие актуальные области пространства параметров модели остаются открытыми и должны исследоваться в новых экспериментах.
8. На графиках несколько раз приводятся результаты (например, сечения на Рис. 4), в которых величина кинетического смешивания ϵ положена равной единице. Непонятно, какой физический смысл в этом случае приписывается соответствующим сечениям, указанным в микробарнах. Возможно, уместнее было бы вынести множитель $1/\epsilon$ на ось ординат.
9. Во введении говорится, что ненулевая масса тёмного фотона предполагается возникающей за счёт механизма Штюкельберга. Далее, на стр. 69 при обсуждении необходимости отсутствия нарушения унитарности при высоких энергиях упоминается механизм Хиггса (в тёмном секторе) как соответствующий источник массы. Из диссертации не ясно, верно ли что в данном случае это различие не имеет значения, поскольку электромагнитный ток, с которым взаимодействует тёмный фотон, предполагается строго сохраняющимся.
10. Представляется, что графики на Рис.10 и Рис.17 являются одними из ключевых результатов работы с точки зрения планирования экспериментов, в частности, эксперимента SHiP. В то же время соответствующее обсуждение весьма лаконично. Хотелось бы видеть более подробное обсуждение роли формфактора Паули в профиле экспериментальной чувствительности при массах более 1.5 ГэВ.
11. Все рисунки сделаны в черно-сером цвете. Иногда трудно различить показанные кривые.

12. В некоторых случаях, при обсуждении диаграмм, вместо соответствующих рисунков стоит ссылка, что эти диаграммы являются аналогами рисунков с другими частицами. Иногда это довольно неудобно.
13. На рисунке 15, кроме главных свойств кривой зависимости полного неупругого сечения тормозного излучения пиона от массы тёмного фотона, связанных с рождением ρ мезона присутствует касп в районе 1 ГэВ и не симметричное распределение в районе $\rho(770)$, который не объяснен в работе. По-видимому эти явления связаны с рождением ω и ϕ -мезонов.

Выбор официального оппонента Афонина С.С. обосновывается его высокой квалификацией в области физики адронов и наличием публикаций по данному направлению в рецензируемых научных журналах. Выбор официального оппонента Шевченко В.И. обосновывается его компетентностью в области физики элементарных частиц и поисков новой физики, и наличием публикаций по данной тематике в рецензируемых научных журналах. Выбор ведущей организации обосновывается тем, что её сотрудники являются признанными экспертами в данной области, а их научные интересы близки к тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложены оригинальный способ аналитической оценки сечения упругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона и новый подход к оценке сечения неупругого тормозного излучения пиона в рамках квазиреального приближения; доказаны применимость приближения Вайцзеккера–Вильямса для оценки величины сечения упругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона и наличие существенной зависимости сечения неупругого тормозного излучения протона от вклада электромагнитного формфактора Паули; введены новые термины, такие как вершинные функции и функции расщепления протона, связанные с электромагнитным формфактором Паули, а также функция расщепления пиона, и продемонстрирована их важность.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

показана применимость приближения эквивалентных фотонов для оценки величины сечения упругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона; применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих методов квантовой теории поля, в том числе процедура факторизации Альтарелли–Паризи, а также методы численного интегрирования и аппроксимации полученных результатов; изложена и подтверждена гипотеза о существенности вклада электромагнитного формфактора Паули в полное сечение рождения тёмного фотона в процессе неупругого тормозного излучения протона; показана неприменимость ведущего порядка киральной теории возмущений к пучкам пионов высоких энергий в задаче о неупругом тормозном излучении пиона; проведена модернизация оценок величины сечения неупругого тормозного излучения протона и пиона с рождением тёмного фотона.

Значение полученных соискателем результатов исследования для экспериментальных исследований подтверждается тем, что:

разработан уникальный метод вычисления сечения рождения тёмного фотона массой 0.4–3.5 ГэВ в процессе неупругого тормозного излучения пиона; определены угловые характеристики рождения тёмного фотона в упругом тормозном излучении протона, необходимые при планировании экспериментов с фиксированной мишенью; оценена чувствительность планируемых в ближайшие годы экспериментов с фиксированной мишенью по поиску видимых распадов тёмных фотонов; представлены оценки вклада тормозного излучения пиона в рождение тёмных фотонов для экспериментов NA64h, T2K, DUNE и SHiP, которые также могут быть использованы в работе организаций ИЯИ РАН, ИФВЭ, ЦЕРН, FNAL, J-PARC.

Оценка достоверности результатов выявила:

проведено сравнение полученного в работе дифференциального сечения упругого тормозного излучения протона с сечением того же процесса, полученном в общепринятом в литературе приближении Вайцеккера–Вильямса; установлено качественное совпадение результатов второй главы диссертации с результатами, независимо полученными зарубежными учёными в работах, посвященных оценке величины сечения неупругого тормозного

излучения протона; идея оценки величины сечения неупругого тормозного излучения пиона базируется на обобщении опыта применения квазиреального приближения к пучкам электронов и протонов в задачах о рождении виртуального фотона в процессе тормозного излучения; для аналитических расчётов в диссертации использованы стандартные современные методы квантовой теории поля.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в получении и апробации всех представленных результатов исследования, а также в подготовке публикаций по выполненной работе.

На заседании 1 октября 2026 года диссертационный совет принял решение за исследование процессов рождения тёмного фотона массой порядка массы лёгких адронов в экспериментах с адронным пучком на фиксированной мишени присудить Крюковой Е.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 7 докторов наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали:

за - 22, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель

диссертационного совета 24.1.163.01

доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

Кравчук Л.В.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.163.01

кандидат физ.-мат. наук

Демидов С.В.

01.10.2026

М.П.