

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ)
мкр. Орлова роща, д. 1, г. Гатчина, Ленинградская область, 188300
Телефон: (81371) 4-60-25, факс: (81371) 3-60-25. E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru
ОКПО 02698654, ОГРН 1034701242443, ИНН 4705001850, КПП 470501001

№ 160
« 11 » июня 2026 г.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора по научной работе
НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ

д.ф.-м.н. В.В. Воронин

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на диссертационную работу Крюковой Екатерины Андреевны «Гипотетические векторные частицы массой порядка массы лёгких адронов в экспериментах с адронным пучком на фиксированной мишени», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика

Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена изучению феноменологии тёмного фотона. Эта гипотетическая частица выступает в роли частицы-медиатора (портала) между частицами стандартной модели и скрытым сектором. Несмотря на все успехи стандартной модели она не описывает все физические явления и, следовательно, нуждается, как минимум, в некотором расширении. На это указывают такие наблюдаемые явления, как осцилляция нейтрино, барионная асимметрия и эффекты тёмной материи.

Попытки расширить СМ в рамках суперсимметричных теорий или теории великого объединения сталкиваются с проблемой описания наблюдаемых спектров частиц или с наличием слишком большого числа параметров. Альтернативным подходом является поиск новой физики,

основанный на простейших феноменологических моделях с минимальным числом дополнительных частиц и параметров. Одним из наиболее перспективных подходов является формализм порталов, в котором к СМ добавляется скрытый сектор, взаимодействующий с обычным веществом только через частицу-медиатор.

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

В первой главе рассмотрен процесс упругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона. Выполнены подробные аналитические вычисления сечения этой реакции с учётом ненулевого переданного импульса. Проведено оригинальное аналитическое исследование применимости приближения Вайцзеккера–Вильямса для случая упругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона (ранее использовавшееся без обоснования). Было показано, что максимум эффективного потока виртуальных бозонов в этой реакции лежит в области переданного импульса порядка масштаба КХД, что поставило под сомнение наивное пренебрежение этим импульсом, ранее предложенное в работе Блюмляйна и Брюннера. В результате, полученное в диссертации сечение с учётом ненулевого переданного импульса согласуется с приближением Вайцзеккера–Вильямса на уровне 3–9%, но расходится на порядок с оценкой Блюмляйна и Брюннера.

Вторая глава посвящена рождению тёмного фотона при неупругом тормозном излучении протона. Особое внимание уделяется анализу роли электромагнитного формфактора Паули в данном процессе. Численно показано, при каких массах тёмного фотона вклад данного формфактора становится определяющим и как из-за этого изменяются кривые чувствительности экспериментов T2K, DUNE и SHiP по отношению к видимым распадам тёмного фотона.

В третьей главе диссертации изучается неупругий процесс тормозного излучения пиона. В рамках квазиреального приближения находится функция расщепления пиона при рождении тёмного фотона. В качестве другого механизма рассмотрен аналог процесса Дрелла–Яна, когда кварк и антикварк аннигилируют в темный фотон. Для обоих рассмотренных процессов получены численные оценки спектров и средней энергии рождаемых тёмных фотонов, а также вычислены дифференциальные и полные сечения.

Новизна работы состоит: 1) В оригинальном аналитическом исследовании применимости приближения Вайцзеккера–Вильямса к упругому тормозному излучению протона с учётом его внутренней структуры. 2) В

полученных оригинальных результатах по учёту электромагнитного формфактора Паули в неупругом тормозном излучении протона в формализме функций расщепления. 3) В применении квази-реального приближения к реакции неупругого тормозного излучения пиона с рождением тёмного фотона.

Научная значимость работы состоит в том, что в ней впервые была проверена применимость приближения Вайцзеккера–Вильямса для случая упругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона. Полученное в диссертации сечение согласуется с приближением Вайцзеккера–Вильямса на уровне 3–9%, но расходится на порядок с популярной оценкой Блюмляйна и Брюннера. Полученные результаты уже используются при планировании экспериментов по поиску тёмных фотонов. Один из наиболее важных результатов состоит в том, что в работе опровергается довольно популярное предположение о малости вклада электромагнитного формфактора Паули в неупругое тормозное излучение протона с рождением тёмного фотона: показано, что в диапазоне масс тёмного фотона 0.4–1.8 ГэВ этот вклад резонансно усиливается вблизи масс векторных мезонов. В результате сечение может в несколько раз превышать предсказания, основанные только на формфакторе Дирака, что должно быть учтено при планировании чувствительности будущих экспериментов. Кроме того, следует отметить, что предложенная для оценки сечения неупругого тормозного излучения пиона с рождением тёмного фотона процедура факторизации в настоящее время является единственным способом вычисления сечений, что особенно важно для оценок чувствительности таких экспериментов как NA64h, T2K, DUNE и SHiP.

Результаты диссертации прошли широкую **апробацию** путём публикации в рецензируемых научных изданиях и выступлений на отечественных и международных школах, семинарах и конференциях. Кроме формфактора Паули при описании неупругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона были подтверждены в более поздних публикациях других ученых. Квазиреальное приближение, использованное для вычисления сечения неупругого тормозного излучения заряженного пиона, ранее было апробировано на примере вычисления сечения рождения стандартного виртуального фотона и сравнения полученных результатов с измеренными данными.

Замечания по работе

В принципе работа читается достаточно легко.

1) Не очень понравилось, что все рисунки сделаны в черно-сером цвете.

Иногда трудно различить показанные кривые.

- 2) В некоторых случаях, при обсуждении диаграмм, вместо соответствующих рисунков стоит ссылка, что эти диаграммы являются аналогами рисунков с другими частицами. В некоторых случаях это довольно неудобно.
- 3) 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.

Отмеченные недостатки не меняют общей **положительной оценки** диссертационной работы. Диссертация Е.А. Крюковой является завершённым научным исследованием: полученные результаты подтверждают достижение поставленной цели. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации. Результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. Тема диссертации соответствует специальности 1.3.3 — Теоретическая физика.

Результаты диссертации Е.А. Крюковой были представлены и обсуждены на объединённом семинаре отделения физики высоких энергий и отделения теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ 16 апреля 2026 г. Отзыв на диссертацию и автореферат утверждён и принят на заседании Учёного совета №160 ОТФ НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ от 11.06.2026.

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

Отзыв подготовили:

к.ф.-м.н., заведующий сектором
квантовой теории поля, отделения
теоретической физики
д.ф.-м.н., заведующий сектором
феноменологии частиц, отделения
теоретической физики

Семенова Алла Николаевна

Саранцев Андрей Викторович

Контакты ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1.

тел.: +7 (813 71) 46025, e-mail: dir@pnpi.nrcki.ru

Сведения о ведущей организации

по диссертации Крюковой Екатерины Андреевны
«Гипотетические векторные частицы массой порядка массы лёгких адронов
в экспериментах с адронным пучком на фиксированной мишени»
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ
Организационно-правовая форма организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение
Ведомственная принадлежность организации	Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Место нахождения	Российская Федерация, Ленинградская обл., г. Гатчина
Почтовый адрес организации	188300, Россия, Ленинградская обл., г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1, НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ
Телефон организации	Телефон: +7 (81371) 46025, Факс: +7 (81371) 36025
Адрес электронной почты	dir@pnpi.nrcki.ru
Адрес официального сайта организации в сети Интернет	www.pnpi.nrcki.ru

Список основных публикаций в рецензируемых научных изданиях работников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации соискателя (не более 15 публикаций):

1. A.Iu. Egorov, V.T. Kim, V.A. Murzin, V.A. Oreshkin. *Dijets with a large rapidity separation in the next-to-leading order BFKL formalism for searches of large extra dimensions at colliders*. Phys. Rev. D. 2026. V. **113**. № 3. P. 035038.
2. V.T. Kim, A.V. Zelenov. *Diquarks for Large- p_T Baryon Production at High-Energy p - p Collisions*. Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. Vol. **22**. No 1. P. 1208.
3. A.V. Sarantsev, E. Klempt, K.V. Nikonov et al. *Decays of N^* and Δ^* resonances into $N\rho$, $\Delta\pi$, and $Nf_0(500)$* . Phys. Rev. C. 2024. Vol. **112**. № 1. P. 015202.

4. V.T. Kim. *Higgs Boson and Naturalness Problem in the Standard Model*. Phys. Part. Nucl. 2024. Vol. **55**. № 1. P. 145.
5. A.Iu. Egorov, V.T. Kim. *Next-to-leading BFKL evolution for dijets with large rapidity separation at different LHC energies*. Phys. Rev. D. 2023. V. **108**.
6. A.A. Baldin, ..., V.T. Kim et al. *FLAP Collaboration: Tasks and Perspectives. Study of Fundamentals and New Applications of Controllable Generation of Electromagnetic Radiation by Relativistic Electrons Using Functional Materials*. Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. Vol. **18**. № 3. P. 338.
7. A.Iu. Egorov, V.T. Kim. *Next-to-Leading BFKL for Mueller Navelet Dijets with Large Rapidity Separation and Jet Veto*. Phys. Atom. Nucl. 2023. Vol. **86**. № 6. P. 1461.
8. A.V. Sarantsev, E. Klempt. *Scalar and tensor mesons in $d\bar{d}$, $s\bar{s}$ and $gg \rightarrow f_0, f_2$* . Int. J. Mod. Phys. A. 2022. Vol. **39**. № 24. P. 2450096.
9. E. Klempt, K.V. Nikonov, A.V. Sarantsev, I. Denisenko. *Search for the tensor glueball*. Phys. Lett. B 2022. Vol. **830**. P. 137171.
10. A. Tumasyan, ..., Kim V. T. et al. *Study of dijet events with large rapidity separation in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV*. JHEP. 2022. Vol. **03**. P. 189.
11. V.V. Abramoy, ..., V.T. Kim et al. *Possible Studies at the First Stage of the NICA Collider Operation with Polarized and Unpolarized Proton and Deuteron Beams*. Phys. Part. Nucl. 2021. Vol. **52**. № 6. P. 1044.