

ОТЗЫВ

официального оппонента **Шевченко Владимира Игоревича** 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

Поиски физических явлений за пределами Стандартной Модели (Новой физики) находятся в фокусе внимания исследователей уже много десятилетий. Ключевым экспериментальным проектом в этом отношении является Большой адронный коллайдер (БАК) в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН). После многих лет успешной работы эксперименты на БАК не только не обнаружили Новую физику, но и исключили либо сильно ограничили ряд её сценариев, которые рассматривались в начале XXI века теоретиками как предпочтительные (низкоэнергетическая суперсимметрия, дополнительные измерения на ТэВ-ной шкале и др.). Поскольку имеются прямые экспериментальные указания (прежде всего, осцилляции нейтрино) на то, что Новая физика существует, это привело к росту интереса к таким её сценариям, которые не могут быть изучены на БАК. Речь идёт прежде всего о переносе акцента с поиска новых степеней свободы в области высоких энергий (Energy Frontier) на поиск новых относительно лёгких (например, в ГэВ-ном диапазоне), но очень слабо взаимодействующих частиц (Intensity Frontier). Для экспериментального изучения таких сценариев предложен ряд экспериментов, среди которых выделяется своей амбицией эксперимент типа beam dump с фиксированной мишенью SHiP, реализуемый в настоящее время в ЦЕРН.

Работа Крюковой Е.А. посвящена изучению сценария Новой физики, в котором фигурирует новое массивное абелево векторное поле, известное как «парафотон» или «тёмный фотон». Рассматривается минимальная модель такого типа, предложенная в 1982 году в работе Л.Б.Окуня, в которой лагранжиан содержит член, пропорциональный произведению тензора напряженности парафотонного поля и тензора напряженности калибровочного поля Стандартной Модели, соответствующего гиперзаряду с некоторым малым параметром кинетического смешивания. Далее изучается феноменология рождения тёмного фотона в нескольких процессах, что имеет важное значение для анализа чувствительности экспериментов к параметрам моделей Новой физики, в которых взаимодействие с сектором Стандартной Модели реализуется через такой абелев векторный портал. Поэтому тема диссертации, несомненно, является актуальной.

По итогам работы на защиту выносятся следующие результаты:

1. Приближение Вайцеккера–Вильямса применимо для описания процесса упругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона и позволяет оценить его сечение с точностью 3–9% по сравнению с более аккуратной аналитической оценкой, учитывающей ненулевую передачу импульса между протонами.
2. Слагаемое с электромагнитным формфактором Паули в вершине взаимодействия протона с тёмным фотоном оказывает значительное влияние на величину полного сечения неупругого тормозного излучения протона с испусканием тёмного фотона.
3. В квазиреальном приближении полное сечение неупругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона описывается с помощью трёх вспомогательных функций расщепления, а не одной.
4. Основным каналом рождения тёмного фотона в $p\pi$ -столкновениях для тёмных фотонов массой 0.4–1.2 ГэВ и при энергиях пучка пионов порядка единиц–десятков ГэВ является неупругое тормозное излучение пиона, чьё

сечение может быть оценено в квазиреальном приближении с помощью формализма функций расщепления.

Данные результаты представляются новыми, надёжно обоснованными и достоверными, что подтверждается как итогами проделанной соискателем научной работы, представленной в публикациях в рецензируемых изданиях, на которых основана диссертация, так и их апробацией на профильных конференциях и семинарах.

Вместе с тем, оппонент отмечает некоторые аспекты работы, по которым могут быть даны дополнительные разъяснения.

1. 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.

2. 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.

3. 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. Верно ли что в данном случае это различие не имеет значения, поскольку электромагнитный ток, с которым взаимодействует тёмный фотон, предполагается строго сохраняющимся?

4. 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. В частности, хотелось бы услышать более подробное обсуждение роли формфактора Паули в профиле экспериментальной чувствительности при массах более 1.5 ГэВ.

Нужно подчеркнуть, что вышеперечисленные комментарии нисколько не снижают ценность и значимость диссертации соискателя. Автореферат диссертации, в целом, хорошо структурирован и ясно излагает основные результаты исследования. Диссертация производит впечатление весьма добротной и качественно оформленной работы. Соискатель свободно ориентируется в профильной литературе. Изложение ясное, ведётся хорошим русским языком. Впервые в своей практике, оппонент не заметил ни одной опечатки.

На основании представленных автореферата и диссертации можно заключить, что диссертация «Гипотетические векторные частицы массой порядка массы лёгких адронов в экспериментах с адронным пучком на фиксированной мишени» Крюковой Екатерины Андреевны, представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика в полной мере соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в текущей редакции), которые предъявляются к кандидатским диссертациям, и Крюкова Екатерина

Андреевна заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – Теоретическая физика.

Официальный оппонент

ректор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», доктор физико-математических наук (01.04.02–Теоретическая физика)

Адрес: 115409, г. Москва,
Каширское шоссе, д. 31, Г-218

Тел.: +7 499 324-3384

Эл.адрес: rector@mephi.ru

Даю согласие на обработку персональных данных и публикацию отзыва на сайте ИЯИ РАН.

Шевченко

Владимир Игоревич

Дата: «11» сентября 2026 г.

Подпись В.И. Шевченко заверяю

директор департамента
кадровой политики

Л.В. Васильченко

Дата: «11» сентября 2026 г.

М.П.

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

1. Шевченко, В. И. и др. Sensitivity of the SHiP experiment to dark photons decaying to a pair of charged particles // European Physical Journal C. — 2021. — Т. 81, № 5. — С. 451. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09224-3.
2. Шевченко, В. И. и др. Sensitivity of the SHiP experiment to light dark matter // Journal of High Energy Physics. — 2021. — Т. 4. — С. 199. — DOI: 10.1007/JHEP04(2021)199.
3. Шевченко, В. И. и др. Study of B_c^+ decays to charmonia and three light hadrons // Journal of High Energy Physics. — 2022. — Т. 1. — С. 065. — DOI: 10.1007/JHEP01(2022)065.
4. Шевченко, В. И. и др. The SHiP experiment at the proposed CERN SPS Beam Dump Facility // European Physical Journal C. — 2022. — Т. 82, № 5. — С. 486. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10346-5.
5. Шевченко, В. И. и др. Measurement of the W boson mass // Journal of High Energy Physics. — 2022. — Т. 1. — С. 036. — DOI: 10.1007/JHEP01(2022)036.
6. Шевченко, В. И. и др. Search for massive long-lived particles decaying semileptonically at $\sqrt{s} = 13$ TeV // European Physical Journal C. — 2022. — Т. 82, № 4. — С. 373. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10186-3.
7. Шевченко, В. И. и др. Measurement of the mass difference and relative production rate of the Ω_b^- and Ξ_b^0 baryons // Physical Review D. — 2023. — Т. 108, № 5. — С. 052008. — DOI: 10.1103/PhysRevD.108.052008.
8. Шевченко, В. И. и др. Observation of muonic Dalitz decays of χ_b mesons and precise spectroscopy of hidden-beauty state // Journal of High Energy Physics. — 2024. — Т. 10. — С. 122. — DOI: 10.1007/JHEP10(2024)122.
9. Шевченко, В. И. и др. Three-pion Bose–Einstein correlations measured in proton–proton collisions // Journal of High Energy Physics. — 2025. — Т. 8. — С. 174. — DOI: 10.1007/JHEP08(2025)174.
10. Шевченко, В. И. и др. Measurement of the branching fraction ratio R_K at large dilepton invariant mass // Journal of High Energy Physics. — 2025. — Т. 7. — С. 198. — DOI: 10.1007/JHEP07(2025)198.
11. Шевченко, В. И. и др. Observation of the rare baryonic decay $B^+ \rightarrow p\Lambda$ and measurement of its weak decay parameter // Physical Review Letters. — 2026. — Т. 136, № 5. — С. 051802. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.136.051802.
12. Шевченко, В. И. и др. Measurement of the multiplicity dependence of Y production ratios in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Journal of High Energy Physics. — 2025. — Т. 5. — С. 011. — DOI: 10.1007/JHEP05(2025)011.