

На правах рукописи

Крюкова Екатерина Андреевна

**Гипотетические векторные частицы массой
порядка массы лёгких адронов
в экспериментах с адронным пучком
на фиксированной мишени**

1.3.3. — Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Научный руководитель:

Горбунов Дмитрий Сергеевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, 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.

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.

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов Сергей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Стандартная модель (СМ), основные теоретические положения которой были разработаны в 60х–70х годах прошлого века, включает в себя все известные на текущий момент элементарные частицы. За многие десятилетия развития, вплоть до экспериментального открытия бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере в 2012 году [1], она позволила дать объяснение широкому кругу явлений, наблюдаемых в физике высоких энергий. Несмотря на её очевидный успех, существует целый ряд доводов в пользу того, что эта теория — не окончательная.

Например, неполноту СМ наглядно демонстрирует открытие нейтринных осцилляций [2, 3], которые не могут происходить в теории с безмассовыми нейтрино, а также наблюдения за галактиками и скоплениями галактик, убеждающие в существовании некой скрытой, ненаблюдаемой тёмной материи, тем не менее, взаимодействующей гравитационно [4]. Необходимость расширения СМ следует и из результатов космологических экспериментов WMAP и Planck, чьи измерения анизотропии и поляризации реликтового излучения позволили определить ряд параметров стандартной космологической модели Λ CDM [5, 6], явно включающей в состав Вселенной тёмную материю и тёмную энергию. Наконец, проблема барионной асимметрии, т.е. преобладание материи и одновременно практически полное отсутствие антиматерии во Вселенной также не находит объяснения в рамках СМ [7].

Ещё в 90х годах прошлого века расширять СМ было принято, формулируя новую фундаментальную теорию, которая сразу давала решение некоторым проблемам СМ и позволяла сделать ряд предсказаний. К числу таких предложений относится широкий класс суперсимметричных теорий [8], теорий великого объединения [9], а также моделей с дополнительными

ми пространственными измерениями [10]. Основной проблемой экспериментальной проверки таких расширений СМ является явная зависимость их предсказаний от разнообразных, многочисленных и иногда свободных параметров модели, что делает многие из них нефальсифицируемыми. Наиболее ярким примером здесь могут служить многолетние бесплодные попытки учёных обнаружить частицы-суперпартнёры, не приводящие при этом к окончательному «закрытию» суперсимметричных моделей.

В связи с этим в последние годы кажется наиболее логичным и естественным начинать поиски новой физики с проверки простейших феноменологических моделей с наименьшим числом новых частиц и параметров. В частности, один из удобных подходов к классификации таких перенормируемых расширений СМ предлагает формализм порталов [11]. В рамках данного формализма к СМ добавляется скрытый сектор, состоящий из частиц новой физики, не участвующих в электромагнитном, слабом и сильном взаимодействиях, а также частица-медиатор, которая очень слабо взаимодействует как с частицами СМ, так и с частицами скрытого сектора [12]. В минимальных, но феноменологически интересных версиях соответствующих моделей скрытый сектор не рассматривается, так что в теории появляется только одна новая частица-медиатор.

Наиболее часто рассматривают скалярный, векторный, фермионный и псевдоскалярный порталы с соответствующими им медиаторами: тёмными скалярами, тёмными фотонами, тяжёлыми нейтральными лептонами и аксиноподобными частицами. Для этого в лагранжиан СМ добавляют слагаемые, которые являются произведениями операторов, состоящих из полей СМ и медиаторов, и не нарушают соответствующие калибровочные симметрии [13]. Данная диссертация посвящена изучению феноменологии медиатора векторного портала — тёмного фотона. Первым эту гипотетическую частицу предложил Л.Б. Окунь в работе [14], где она называлась «парафотон».

В диссертации рассматривалась минимальная модель тём-

ного фотона [14, 15, 16], в которой лагранжиан СМ \mathcal{L}_{SM} расширяется векторным полем \tilde{A}'_μ , соответствующим новой калибровочной группе $U(1)'$,

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} - \frac{1}{4} \tilde{F}'_{\mu\nu} \tilde{F}'^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2 \cos \theta_W} \tilde{F}'_{\mu\nu} B^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2} \tilde{A}'_\mu \tilde{A}'^\mu, \quad (1)$$

где $\tilde{F}'_{\mu\nu}$ — тензор напряженности тёмного фотона, $B_{\mu\nu}$ — тензор напряженности калибровочного поля СМ, соответствующего гиперзаряду, ϵ — параметр кинетического смешивания, θ_W — угол смешивания Вайнберга, а масса тёмного фотона $m_{\gamma'}$ возникает по механизму Штюкельберга [17]. Одновременно вращая третью компоненту слабого калибровочного поля СМ W_μ^3 , поле гиперзаряда СМ B_μ и новое векторное поле \tilde{A}'_μ , можно сделать диагональными кинетические и массовые слагаемые с точностью до $\mathcal{O}(\epsilon^2)$ [18]. Таким образом получается новый базис векторных полей, состоящий из массивного Z -бозона, фотона СМ A_μ и тёмного фотона A'_μ с той же массой $m_{\gamma'}$.

В результате этого вращения тёмный фотон взаимодействует с электромагнитным током СМ

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -\epsilon e J_{\text{em}}^\mu A'_\mu. \quad (2)$$

В подобных сценариях тёмный фотон также может взаимодействовать с фермионами тёмного сектора (в том числе с теми, которые образуют тёмную материю [19]), но в данной работе они не рассматриваются, поскольку не дают вклада в рождение тёмных фотонов. Таким образом, модель характеризуется двумя параметрами: массой тёмного фотона $m_{\gamma'}$ и параметром кинетического смешивания ϵ .

Векторный портал активно исследовался в экспериментах с мишенью и электронным пучком, мишенью и протонным пучком, на e^+e^- -коллайдерах и на протон-протонных коллайдерах, см. обзор экспериментальных поисков тёмного фотона в [11]. Однако для тёмных фотонов с массой выше 0.8 ГэВ экспериментальные ограничения всё ещё довольно слабые, $\epsilon <$

$5 \cdot 10^{-3}$ [20]. Поэтому разрабатываются эксперимент DUNE [21, 22] и недавно поддержанный эксперимент SHiP [23], нацеленные в том числе на поиск тёмных фотонов массой около 1 ГэВ, образующихся в pp -столкновениях [24]. Кроме того, в 2023 году был усовершенствован и приступил к работе ближний детектор ND280 эксперимента T2K [25], чья потенциальная чувствительность к тёмным фотонам обсуждалась в [26]. В 2024 году были проведены первые измерения в эксперименте NA64h с пучком отрицательно заряженных пионов [27]. Чтобы оценить чувствительность этих проектов к параметрам модели с новой частицей, нужно изучить феноменологию тёмного фотона с массой $\mathcal{O}(1)$ ГэВ, в частности, его каналы рождения.

Выделяют три основных канала рождения тёмных фотонов γ' в pp -столкновениях: распады нейтральных мезонов, например, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma'$, $\eta \rightarrow \gamma\gamma'$, тормозное излучение протона и процесс Дрелла–Яна в квантовой хромодинамике (КХД) $q\bar{q} \rightarrow \gamma'$ [28]. В статье [23] для пучка протонов с энергией 400 ГэВ, характерной для эксперимента SHiP, было показано, что каждый из перечисленных каналов является доминирующим для рождения тёмных фотонов с массой до 0.4 ГэВ, 0.4–1.8 ГэВ и от 1.8 ГэВ соответственно. Наибольший теоретический интерес вызывают процессы упругого и неупругого тормозного излучения протона, которым посвящены первая и вторая главы данной диссертации.

Для масс тёмного фотона 0.4–1.8 ГэВ некоторые из существующих теоретических предсказаний для упругого сечения рождения тёмных фотонов [29, 30, 31] заметно отличаются друг от друга [31]. Подробное обсуждение этих работ приведено в параграфе 1.1. Наиболее часто используемые результаты по оценке сечения неупругого тормозного излучения протона в контексте рождения частиц новой физики были получены в статьях [32] (тёмные скаляры) и [33] (тёмные фотоны). Кроме того, особенно популярным для оценок сечения рождения тёмных фотонов в процессе неупругого тормозного излучения протона долгое время был результат работы [30], однако в послед-

ствии его достоверность была поставлена под сомнение [31, 34]. Обзор перечисленных оценок, выходящий за рамки введения, можно найти в параграфе 2.1.

Четвертый механизм рождения тёмного фотона связан с неупругим тормозным излучением вторичных пионов (либо пионов пучка как, например, в эксперименте NA64h) $\pi p \rightarrow \gamma' X$. Он был впервые предложен в недавней работе [35] в рамках киральной теории возмущений. Критику такого подхода можно найти в параграфе 3.1 третьей главы диссертации, посвященной изучению рождения тёмных фотонов массой 0.4–3.5 ГэВ в процессе неупругого тормозного излучения пиона и в аналоге процесса Дрелла–Яна с участием партонов в рамках пертурбативной КХД.

Цели и задачи исследования

Целью данного исследования является вычисление сечений рождения тёмных фотонов массой порядка 1 ГэВ в результате pp - и $\pi^- p$ -столкновений в экспериментах с фиксированной мишенью. При этом отдельно рассматриваются процессы упругого и неупругого тормозного излучения протона, а также неупругого тормозного излучения пиона с испусканием тёмного фотона.

Одной из задач исследования являлось вычисление сечения упругого тормозного излучения с учётом ненулевого переданного импульса между протонами. Практически все известные в литературе оценки для тормозного излучения протона получены в приближении нулевой передачи импульса (см. параграф 1.1), строго обоснованном только для пучков бесструктурных фермионов, например, для электронов. В связи с этим требовалось вычислить сечение упругого тормозного излучения протона аналитически, не пренебрегая обменом импульсом между налетающим протоном и протоном мишени, и изучить, насколько полученный результат отличается от других известных оценок.

Другой задачей диссертации было изучение вклада электромагнитного формфактора Паули в неупругое тормозное из-

лучение протона. Известные в литературе работы по вычислению сечения неупругого тормозного излучения (см. параграф 2.1) пренебрегали вкладом формфактора Паули, вероятнее всего, из-за его кажущейся малости на уровне параметрических оценок. Однако внимательное рассмотрение величины электромагнитных формфакторов протона в исследуемой области масс тёмного фотона показало, что указанный вклад может быть заметно усилен вблизи резонансов векторных мезонов (см. параграф 2.2). В связи с этим было интересно добавить в известную оценку сечения неупругого тормозного излучения [31] вклад электромагнитного формфактора Паули и проверить справедливость предположения о его малости.

Наконец, третья задача диссертации — оценить величину сечения неупругого тормозного излучения пиона $\pi^- p \rightarrow \gamma' X$. Мотивацией послужила возможность поиска тёмного фотона при тормозном излучении в эксперименте NA64h, в котором на мишень направляется пучок пионов с энергией 50 ГэВ. Поскольку в данном случае используются пионы высоких энергий, требовалось изучить применимость к данному процессу ведущего порядка киральной теории возмущений (см. параграф 3.1), ранее использованного для аналогичной оценки в работе [35]. Кроме того, были поставлены задачи оценить сечение неупругого тормозного излучения пиона в квазиреальном приближении и сечение аналога процесса Дрелла–Яна в рамках пертурбативной КХД.

Научная новизна исследования

Все основные результаты, выдвигаемые на защиту, являются новыми. Так, впервые было аналитически рассмотрено упругое тормозное излучение протона с ненулевым импульсом, переданным между налетающим протоном и протоном мишени. Ранее в работе [31] аналогичное вычисление для обмена векторным помероном было проделано численно. Применимость приближения Вайцеккера–Вильямса для рождения тёмного фотона в тормозном излучении электрона ранее изучалась в [36], однако в данной диссертации впервые обсуждается вопрос его

применимости в задаче о рождении тёмных фотонов с помощью пучка протонов, мотивированный в первую очередь наличием у протона внутренней структуры.

Вторая глава, посвящённая неупругому тормозному излучению протона, развивает методы, сформулированные в работах [31, 32], и содержит принципиально новые результаты для вершинных функций и функций расщепления, связанных с электромагнитным формфактором Паули.

В третьей главе впервые показано, что ведущий порядок киральной теории возмущений, ранее использованный в [35] для оценки сечения упругого тормозного излучения пиона, неприменим для энергий пучка пионов в существующих и строящихся экспериментах. Для описания неупругого тормозного излучения пиона в данной диссертации впервые применяется квазиреальное приближение, разработанное в [37] для тормозного излучения электронов в рамках СМ. Кроме того, в контексте пион-протонных столкновений как источника тёмных фотонов впервые подробно изучается вклад аналога процесса Дрелла–Яна, в котором один из партонов входит в состав заряженного пиона.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Результаты, полученные в первой главе диссертации для рождения тёмных фотонов в процессе упругого тормозного излучения протона, позволяют использовать для оценки величины этого сечения приближение Вайцзеккера–Вильямса, которое изначально было сформулировано для бесструктурных фермионов. При таком подходе значительно сокращается время, требующееся для проведения численных расчётов, связанных с упругим тормозным излучением протона. Кроме того, найденная зависимость дифференциального сечения упругого тормозного излучения протона от поперечного импульса тёмного фотона важна для оценок углов, под которыми последний может рождаться в эксперименте.

Исследование неупругого тормозного излучения протона,

проведённое во второй главе, выявило ранее неучтённые и существенные вклады в полное сечение рождения тёмного фотона. Полученные результаты для неупругого тормозного излучения особенно значимы в контексте оценки чувствительности планируемых в ближайшие годы экспериментов с фиксированной мишенью по поиску частиц новой физики.

Рождение тёмного фотона в процессе тормозного излучения пиона, изучавшееся в третьей главе диссертации, представляется потенциально важным процессом для экспериментальных поисков этой частицы новой физики как в экспериментах с пионным пучком типа NA64h, так и в нейтринных экспериментах с пучком протонов (T2K, DUNE) и в установках с пучком протонов, падающих на фиксированную мишень (SHiP), где рассеяния вторичных пионов также дают вклад в рождение тёмных фотонов. Учитывая неприменимость киральной теории возмущений к пучкам пионов высоких энергий, продемонстрированную в данной диссертации, развитый метод вычислений является на данный момент единственным способом оценить величину сечения неупругого тормозного излучения пиона для масс тёмного фотона 0.4–3.5 ГэВ, что говорит о несомненной теоретической значимости и практической востребованности полученных результатов.

Методология и используемые методы исследования

Аналитические расчёты диссертации проводились с использованием стандартных методов квантовой теории поля, в частности, современной теории возмущений и диаграммной техники Фейнмана. Кроме того, были проведены аналитические расчёты в рамках процедуры факторизации Альтарелли–Паризи [38] и квазиреального приближения [31, 37], в третьей главе применялась поправка Доусон [33, 39].

Для численных оценок были использованы методы численного интегрирования и аппроксимации полученных результатов. При работе с экспериментальными результатами, опубликованными Particle Data Group [40], применялись методы интерполяции и сглаживания данных. Было использовано следу-

ющее программное обеспечение: система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica, пакет FeynCalc, программные библиотеки pandas, numpy и программа gnuplot. Для вычислений в пертурбативной КХД использовалась библиотека LHAPDF и наборы функций распределения партонов JAM21PionPDFnlo, CT14l0 и CT14nlo.

Положения, выносимые на защиту

1. Приближение Вайцзеккера–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 pp -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.

Достоверность и обоснованность результатов

Результаты, полученные в диссертации, были опубликованы в рецензируемых научных журналах, а также докладывались на многочисленных школах, семинарах и конференциях,

в том числе международного уровня. Достоверность полученного в первой главе дифференциального сечения упругого тормозного излучения протона подтверждается его согласием с известным в литературе приближением Вайцеккера–Вильямса с точностью 3–9%. Вывод второй главы о необходимости учёта вклада электромагнитного формфактора Паули при оценке сечения неупругого тормозного излучения был независимо подтверждён Форуги-Абари, Ремитцем и Ритцем в работе [33]. Оценка величины сечения неупругого тормозного излучения пиона, проведённая в третьей главе, опирается на хорошо известное в литературе квазиреальное приближение, чья применимость для оценки сечения тормозного излучения электрона и протона ранее была проверена путём сравнения с экспериментально измеренными сечениями аналогов этих процессов, в которых вместо тёмного фотона рождался виртуальный фотон СМ.

Апробация результатов исследования

Основные результаты, изложенные в диссертации, были представлены автором на семинаре «Физика адронов» ЛТФ ОИЯИ (2022), Зимней школе ПИЯФ (2023, 2024, 2025), Курчатовской молодежной научной школе (2023), Школе для молодых учёных и специалистов по физике элементарных частиц и космологии им. В.А. Рубакова (стендовый доклад, 2023), Международной конференции по физике частиц и космологии (2023), Всероссийской научной конференции МФТИ (2024), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (2024), Молодёжной конференции «Физика элементарных частиц и космология» (2024), Московской международной школе физики (2024), Научной сессии секции ядерной физики ОФН РАН (2024, 2025, 2026), Международном семинаре по физике высоких энергий «Кварки» (2024), Конференции к 100-летию Е.С. Фрадкина (2024), Международной конференции по физике частиц и астрофизике (2024), семинаре ОТФ ИЯИ РАН (2024), конференции, посвященной изучению физики очень слабо взаимодействующих частиц в

эксперименте LHCb (2025), Международной Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц (2025).

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в данной диссертации, тексты публикаций, лежащие в её основе, а также приведённые в ней рисунки получены, написаны и подготовлены лично автором или при её определяющем участии.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, трёх 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дан краткий обзор формализма порталов, вводится минимальная модель тёмного фотона и обсуждаются основные каналы рождения тёмного фотона массой порядка 1 ГэВ в протон-протонных и пион-протонных столкновениях. Там же дана общая характеристика работы и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена изучению процесса упругого тормозного излучения протона как потенциального источника тёмных фотонов. В **параграфе 1.1** дан краткий обзор существующих оценок сечения тормозного излучения: приближения Вайцеккера–Вильямса и результата Блюмляйна и Брюннера. Вводятся формфактор, связанный с гипотезой о доминантности векторных мезонов, и феноменологический адронный формфактор F_{virt} для промежуточного протона вне массовой поверхности. В конце параграфа отмечается, что оба упомянутых подхода основаны на предположении о том, что максимум потока гипотетических векторных бозонов, отвечающих за упругое взаимодействие протонов, достигается при фактически нулевых квадратах импульса этих частиц. Показано, что

для упругого тормозного излучения протона данное предположение выполняется не столь хорошо, как в случае электронного пучка, для которого оно было разработано исходно.

В связи с этим в **параграфе 1.2** проведено вычисление сечения упругого тормозного излучения протона с ненулевой передачей импульса. Для этого рассматриваются две диаграммы Фейнмана, в которых промежуточный протон является виртуальным, а его упругое взаимодействие с протоном мишени описывается как процесс обмена гипотетическим безмассовым векторным бозоном с 4-импульсом q . В результате аналитически, с точностью до слагаемых порядка q^2 , находится дифференциальное сечение упругого тормозного излучения протона $d^2\sigma/dzdk_{\perp}^2$, где z — доля 3-импульса, уносимого тёмным фотоном в направлении оси пучка, а k_{\perp} — величина 3-импульса тёмного фотона в направлении, перпендикулярном этой оси.

В **параграфе 1.3** представлены численные результаты для типичных масс тёмных фотонов и сравнение их с результатами, полученными в других приближениях. В частности, для различных масс тёмного фотона в диапазоне от 0.4 ГэВ до 1.75 ГэВ и для импульса пучка протонов $P = 120$ ГэВ в лабораторной системе отсчёта, соответствующего строящемуся эксперименту DUNE, найдена зависимость дифференциального сечения упругого тормозного излучения протона от z и k_{\perp}^2 . Кроме того, 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 Бломляйном и Бруннером [30], Форуги-Абари и Ритцем [31] и в приближении Вайцзеккера-Вильямса [29]. Показано, что если положить $F_{\text{virt}} = 1$, результаты данной работы, Форуги-Абари и Ритца и приближение Вайцзеккера-Вильямса согласуются друг с другом с точностью 3–9%.

Основные выводы, обсуждение полученных в первой главе

результатов и перспективы дальнейшей работы приведены в **параграфе 1.4**. Например, кажется перспективным рассмотреть упругое рассеяние протонов не как процесс обмена безмассовым векторным гипотетическим бозоном с фотонным пропагатором, а как обмен эффективной частицей, тензорным помеоном, с нетривиальной зависимостью пропагатора от квадрата 4-импульса q^2 .

Во **второй главе** изучается вклад электромагнитного формфактора Паули в сечение неупругого тормозного излучения протона с рождением тёмного фотона. **Параграф 2.1** содержит краткий обзор существующих подходов к оценке сечения неупругого тормозного излучения протона: процедуры факторизации, реализованной для тёмного фотона Форуги-Абари и Ритцем [31], и результата Бломляйна и Бруннера [30]. Отмечено, что в работе [31] при рассмотрении вершины взаимодействия $pp\gamma'$ учтён только вклад электромагнитного формфактора Дирака $F_1(m_{\gamma'}^2)$ и что для полноты это вычисление следует дополнить, добавляя вклад электромагнитного формфактора Паули $F_2(m_{\gamma'}^2)$.

Описание упомянутых выше электромагнитных формфакторов протона в рамках аналитических подгонок к экспериментальным данным, выполненных Мартемьяновым, Фесслером и Криворученко [41], Дубничкой и Дубничковой [42], а также адронных формфакторов вне массовой поверхности, используемых в дальнейшем вычислении, представлено в **параграфе 2.2**.

Основные аналитические результаты по факторизации сечения неупругого тормозного излучения с учётом протонных электромагнитных формфакторов Дирака и Паули изложены в **параграфе 2.3**. Там же найдена главная функция расщепления протона $w_{\text{mas}}(z, k_{\perp}^2)$, зависящая от квадратичных комбинаций электромагнитных формфакторов Дирака и Паули и трёх вспомогательных функций расщепления, две из которых ($w_{12}(z, k_{\perp}^2)$ и $w_{22}(z, k_{\perp}^2)$) связаны с учётом формфактора Паули и получены впервые.

В параграфе 2.4 для импульса протона пучка $P = 120$ 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 со вкладом обоих формфакторов. Показано, что обновлённый ответ даёт заметно больший результат, в особенности для масс тёмного фотона, близких к массам резонансов векторных мезонов.

В параграфе 2.5 оценена ожидаемая чувствительность к видимым распадам тёмного фотона ближнего детектора ND280 T2K [26], многоцелевого детектора DUNE [22] и распадного объёма SHiP [23]. Проведено сравнение с оценками чувствительности, включающими только вклад формфактора Дирака, и показано, что результат данной диссертации значительно расширяет область, доступную для поиска тёмных фотонов.

Результаты второй главы и возможные направления развития исследования неупругого тормозного излучения обсуждаются в параграфе 2.6.

В третьей главе рассматривается рождение тёмных фотонов в процессе тормозного излучения заряженного пиона. В параграфе 3.1 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 [27], дифференциальное сечение упругого пион-протонного рассеяния, найденное в ведущем порядке киральной теории, находится в противоречии с измерениями Фермилаб. Поэтому ранее предложенная в литературе оценка для сечения упругого тормозного излучения пиона в том же порядке киральной теории [35] представляется не работающей при высоких энергиях пучков, соответствующих реальным экспериментам.

Альтернативная оценка сечения неупругого тормозного излучения пиона с рождением тёмных фотонов массой 0.4–1.2 ГэВ предложена в параграфе 3.2. Вычисление проведено в квази-реальном приближении с исправленной с помощью поправки

Доусон [39] 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.

Для тёмных фотонов с массами 1.2–3.5 ГэВ основной вклад в рождение тёмных фотонов в экспериментах с пучком пионов с энергией порядка единиц – десятков ГэВ даёт аналог процесса Дрелла–Яна. В **параграфе 3.3** приведены численные оценки сечения данного процесса в ведущем и следующем за ведущим порядках теории возмущений по константе сильного взаимодействия, выполненные с помощью библиотеки LHAPDF. Как и в предыдущем параграфе, 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. В данном случае, напротив, в основном рождаются тёмные фотоны низких энергий. 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.

Параграф 3.4 подводит итоги третьей главы диссертации. 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).

Закключение содержит краткую формулировку результа-

тов исследований, представленных в диссертации, и основные выводы, полученные в ходе выполнения этой работы.

В **приложении А** изложен вывод структурной функции протона из экспериментальных данных по упругому pp -рассеянию. Оценка чувствительности эксперимента SHiP к тёмным фотонам на основе процесса упругого тормозного излучения дана в **приложении В**. **Приложение С** содержит выражения для квадратичных комбинаций вершинных функций. В **приложении D** приведены численные параметры подгонки вспомогательных сечений для процесса неупругого тормозного излучения и графики их относительных отклонений от результатов численного интегрирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертация посвящена изучению рождения тёмных фотонов массой $\mathcal{O}(1)$ ГэВ в экспериментах с фиксированной мишенью в процессах упругого и неупругого тормозного излучения протона, а также неупругого тормозного излучения пиона.

В частности, в первой главе сечение упругого тормозного излучения протона было найдено аналитически, явно учитывая ненулевой переданный импульс между протонами. С его помощью была показана применимость приближения Вайцзеккера–Вильямса к протонным пучкам с точностью 3–9%.

Во второй главе диссертации в квазиреальном приближении были найдены новые вклады в сечение неупругого тормозного излучения протона, связанные с учётом электромагнитного формфактора Паули. Резонансное усиление при массе тёмного фотона, близкой к массам векторных мезонов, делает найденные поправки к сечению сопоставимыми по величине, а иногда и превышающими исходную оценку вклада в сечение от электромагнитного формфактора Дирака.

Третья глава диссертации посвящена относительно новому каналу рождения тёмного фотона — тормозному излучению пиона. Для пионов с энергиями, соответствующими экспери-

менту NA64h, была показана неприменимость ранее опубликованных оценок в ведущем порядке киральной теории возмущений. Были получены альтернативные оценки для сечения неупругого тормозного излучения пиона в квазиреальном приближении и для сечения аналога процесса Дрелла–Яна в рамках пертурбативной КХД.

Результаты, полученные в диссертации, играют важную роль для оценок чувствительности экспериментов с протонными и пионными пучками к тёмным фотонам.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

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. (журнал индексирован в Q1 базы данных Web of Science)
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. (журнал индексирован в Q1 базы данных Web of Science)
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. (журнал индексирован в Q3 базы данных Web of Science)
4. Gorbunov D., Kriukova E. Pion bremsstrahlung in the splitting function formalism and the dark photon production // Journal

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Aad Georges et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC // Phys. Lett. B. — 2012. — Vol. 716. — P. 1–29. — arXiv: 1207.7214 [hep-ex].
- [2] Fukuda Y. et al. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos // Phys. Rev. Lett. — 1998. — Vol. 81. — P. 1562–1567. — arXiv: hep-ex/9807003.
- [3] Ahmad Q. R. et al. Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory // Phys. Rev. Lett. — 2001. — Vol. 87. — P. 071301. — arXiv: nucl-ex/0106015.
- [4] Rubin V. C., Thonnard N., Ford Jr. W. K. Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 /R = 4kpc/ to UGC 2885 /R = 122 kpc/ // Astrophys. J. — 1980. — Vol. 238. — P. 471.
- [5] Hinshaw G. et al. Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results // Astrophys. J. Suppl. — 2013. — Vol. 208. — P. 19. — arXiv: 1212.5226 [astro-ph.CO].
- [6] Aghanim N. et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters // Astron. Astrophys. — 2020. — Vol. 641. — P. A6. — [Erratum: Astron.Astrophys. 652, C4 (2021)]. arXiv: 1807.06209 [astro-ph.CO].
- [7] Canetti Laurent, Drewes Marco, Shaposhnikov Mikhail. Matter and Antimatter in the Universe // New J. Phys. — 2012. — Vol. 14. — P. 095012. — arXiv: 1204.4186 [hep-ph].

- [8] Martin Stephen P. A Supersymmetry primer // Adv. Ser. Direct. High Energy Phys. — 1998. — Vol. 18. — P. 1–98. — arXiv: hep-ph/9709356.
- [9] Raby Stuart. Supersymmetric Grand Unified Theories: From Quarks to Strings via SUSY GUTs. — Springer, 2017. — Vol. 939. — ISBN: 978-3-319-55253-8, 978-3-319-55255-2.
- [10] Csaki Csaba. TASI lectures on extra dimensions and branes // Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics (TASI 2002): Particle Physics and Cosmology: The Quest for Physics Beyond the Standard Model(s). — 2004. — 4. — P. 605–698. — arXiv: hep-ph/0404096.
- [11] Agrawal Prateek et al. Feebly-interacting particles: FIPs 2020 workshop report // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 11. — P. 1015. — arXiv: 2102.12143 [hep-ph].
- [12] Lanfranchi Gaia, Pospelov Maxim, Schuster Philip. The Search for Feebly Interacting Particles // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. — 2021. — Vol. 71. — P. 279–313. — arXiv: 2011.02157 [hep-ph].
- [13] Beacham J. et al. Physics Beyond Colliders at CERN: Beyond the Standard Model Working Group Report // J. Phys. G. — 2020. — Vol. 47, no. 1. — P. 010501. — arXiv: 1901.09966 [hep-ex].
- [14] Okun L. B. Limits of electrodynamics: paraphotons? // Sov. Phys. JETP. — 1982. — Vol. 56. — P. 502.
- [15] Galison Peter, Manohar Aneesh. TWO Z's OR NOT TWO Z's? // Phys. Lett. B. — 1984. — Vol. 136. — P. 279–283.
- [16] Holdom Bob. Two U(1)'s and Epsilon Charge Shifts // Phys. Lett. B. — 1986. — Vol. 166. — P. 196–198.
- [17] Ruegg Henri, Ruiz-Altaba Marti. The Stueckelberg field // Int. J. Mod. Phys. A. — 2004. — Vol. 19. — P. 3265–3348. — arXiv: hep-th/0304245.

- [18] Miller David J. The physics of the dark photon: a primer // Contemp. Phys. — 2021. — Vol. 62, no. 2. — P. 110.
- [19] Pospelov Maxim, Ritz Adam, Voloshin Mikhail B. Secluded WIMP Dark Matter // Phys. Lett. B. — 2008. — Vol. 662. — P. 53–61. — arXiv: 0711.4866 [hep-ph].
- [20] Graham Matt, Hearty Christopher, Williams Mike. Searches for Dark Photons at Accelerators // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. — 2021. — Vol. 71. — P. 37–58. — arXiv: 2104.10280 [hep-ph].
- [21] Abi B. et al. Prospects for beyond the Standard Model physics searches at the Deep Underground Neutrino Experiment // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 4. — P. 322. — arXiv: 2008.12769 [hep-ex].
- [22] Searching for physics beyond the Standard Model in an off-axis DUNE near detector / Moritz Breitbach, Luca Buonocore, Claudia Frugiuele et al. // JHEP. — 2022. — Vol. 01. — P. 048. — arXiv: 2102.03383 [hep-ph].
- [23] Ahdida C. et al. Sensitivity of the SHiP experiment to dark photons decaying to a pair of charged particles // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 5. — P. 451. — arXiv: 2011.05115 [hep-ex].
- [24] Exploring Dark Sector Portals with High Intensity Experiments / Brian Batell, Nikita Blinov, Christopher Hearty, Robert McGehee // Snowmass 2021. — 2022. — 7. — arXiv: 2207.06905 [hep-ph].
- [25] Light dark matter in neutrino beams: production modelling and scattering signatures at MiniBooNE, T2K and SHiP / Patrick deNiverville, Chien-Yi Chen, Maxim Pospelov, Adam Ritz // Phys. Rev. D. — 2017. — Vol. 95, no. 3. — P. 035006. — arXiv: 1609.01770 [hep-ph].

- [26] New constraint on dark photon at T2K off-axis near detector / Takeshi Araki, Kento Asai, Tomoya Iizawa et al. // JHEP. — 2023. — Vol. 11. — P. 056. — arXiv: 2308.01565 [hep-ph].
- [27] Andreev Yu. M. et al. Dark-Sector Search via Pion-Produced η and η' Mesons Decaying Invisibly in the NA64h Detector // Phys. Rev. Lett. — 2024. — Vol. 133, no. 12. — P. 121803. — arXiv: 2406.01990 [hep-ex].
- [28] Kyselov Yehor, Mrenna Stephen, Ovchynnikov Maksym. New physics particles mixing with mesons: Production in the fragmentation chain // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 112, no. 5. — P. 055033. — arXiv: 2504.06828 [hep-ph].
- [29] Kim Kwang Je, Tsai Yung-Su. Improved Weizsacker-Williams method and its application to lepton and W boson pair production // Phys. Rev. D. — 1973. — Vol. 8. — P. 3109.
- [30] Blümlein Johannes, Brunner Jürgen. New Exclusion Limits on Dark Gauge Forces from Proton Bremsstrahlung in Beam-Dump Data // Phys. Lett. B. — 2014. — Vol. 731. — P. 320–326. — arXiv: 1311.3870 [hep-ph].
- [31] Foroughi-Abari Saeid, Ritz Adam. Dark sector production via proton bremsstrahlung // Phys. Rev. D. — 2022. — Vol. 105, no. 9. — P. 095045. — arXiv: 2108.05900 [hep-ph].
- [32] Phenomenology of GeV-scale scalar portal / Iryna Boiarska, Kyrylo Bondarenko, Alexey Boyarsky et al. // JHEP. — 2019. — Vol. 11. — P. 162. — arXiv: 1904.10447 [hep-ph].
- [33] Foroughi-Abari Saeid, Reimitz Peter, Ritz Adam. Closer look at dark vector splitting functions in proton bremsstrahlung // Phys. Rev. D. — 2025. — Vol. 112, no. 1. — P. 015030. — arXiv: 2409.09123 [hep-ph].
- [34] Gorbunov Dmitry, Kriukova Ekaterina. Dark photon production via elastic proton bremsstrahlung with non-zero

momentum transfer // JHEP. — 2024. — Vol. 01. — P. 058. — arXiv: 2306.15800 [hep-ph].

- [35] Curtin David, Kahn Yonatan, Nguyen Rachel. Dark photons from charged pion bremsstrahlung at proton beam experiments // Phys. Rev. D. — 2023. — Vol. 108, no. 9. — P. 095039. — arXiv: 2305.19309 [hep-ph].
- [36] Liu Yu-Sheng, Miller Gerald A. Validity of the Weizsäcker-Williams approximation and the analysis of beam dump experiments: Production of an axion, a dark photon, or a new axial-vector boson // Phys. Rev. D. — 2017. — Vol. 96, no. 1. — P. 016004. — arXiv: 1705.01633 [hep-ph].
- [37] Baier V. N., Fadin Victor S., Khoze Valery A. Quasireal electron method in high-energy quantum electrodynamics // Nucl. Phys. B. — 1973. — Vol. 65. — P. 381–396.
- [38] Altarelli Guido, Parisi G. Asymptotic Freedom in Parton Language // Nucl. Phys. B. — 1977. — Vol. 126. — P. 298–318.
- [39] Dawson Sally. The Effective W Approximation // Nucl. Phys. B. — 1985. — Vol. 249. — P. 42–60.
- [40] Navas S. et al. Review of particle physics // Phys. Rev. D. — 2024. — Vol. 110, no. 3. — P. 030001.
- [41] Faessler Amand, Krivoruchenko M. I., Martemyanov B. V. Once more on electromagnetic form factors of nucleons in extended vector meson dominance model // Phys. Rev. C. — 2010. — Vol. 82. — P. 038201. — arXiv: 0910.5589 [hep-ph].
- [42] Dubnickova Anna Zuzana, Dubnicka Stanislav. Proton em form factors data are in disagreement with new $\sigma_{tot}(e^+e^- \rightarrow p\bar{p})$ measurements. — 2020. — 10. — arXiv: 2010.15872 [hep-ph].

Научное издание
Крюкова Екатерина Андреевна
Гипотетические векторные частицы массой
порядка массы лёгких адронов
в экспериментах с адронным пучком
на фиксированной мишени

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 04.05.2026

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,1 Зак. № 025/26 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а