

**Отзыв научного руководителя
на диссертацию Екатерины Андреевны Крюковой
«Гипотетические векторные частицы массой порядка массы лёгких
адронов в экспериментах с адронным пучком на фиксированной мишени»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.3 — теоретическая физика.**

Построение обобщений Стандартной модели физики элементарных частиц, изучение их феноменологических следствий и экспериментальные проверки предсказаний является одним из важнейших направлений в современной физике. Убедительную мотивацию даёт неспособность объяснения в рамках Стандартной модели ряда явлений, среди которых стоит отметить нейтринные осцилляции, многочисленные астрофизические и космологические проявления тёмной материи, барионную асимметрию Вселенной. Среди предсказываемых новых частиц лёгкие векторные частицы, парафотоны, могут взаимодействовать с известными фотоном и Z -бозоном посредством так называемого векторного портала — нового перенормируемого взаимодействия с безразмерной константной связью. Малость величины этой константы объясняет отсутствие экспериментальных указаний на прямую регистрацию такой частицы на отработавших и современных установках. Среди прочего, такие частицы могли бы обеспечивать взаимодействие с частицами скрытого сектора, заряженными по новой калибровочной группе, в том числе кандидатами на роль частиц тёмной материи. Прямой поиск таких частиц можно вести в экспериментах с пучком энергичных частиц, рассеиваемых на фиксированной мишени, что даёт максимальную светимость, необходимую для рождения частиц с малыми константами связи. В дальнейшем такие частицы могут вылетать из мишени и в результате распада давать сигнал в отстоящем детекторе, например, в виде рождения пар электрически заряженных частиц Стандартной модели. Для постановки задачи о поиске парафотонов и получения ограничений на модельные параметры из данных уже отработавших экспериментов необходимо аккуратно вычислить дифференциальное сечение рождения таких частиц, что даст возможность предсказать их энергетический спектр и угловое распределение.

Представленная диссертационная работа Екатерины Андреевны Крюковой посвящена вычислению сечения рождения гипотетических векторных частиц массой порядка ГэВ в рассеянии протонов и заряженных пионов на мишени. При этом рассматривается только минимальное взаимодействие этих частиц с видимым сектором — через смешивание с фотоном в кинетическом слагаемом лагранжиана — так что в результате имеется только два модельных параметра: масса парафотона и безразмерная константа смешивания. Полученные результаты весьма универсальны и могут быть использованы для широкого класса моделей с лёгкими векторными частицами, проверка которых является одной из основных или

вспомогательных задач для всех работающих и строящихся экспериментов с адронными пучками на мишени, например DUNE, SHiP, T2K, NA64h. Это показывает актуальность тематики диссертации и востребованность полученных в ней результатов в научном сообществе.

Сложность задачи состоит в отсутствии адекватных пертурбативных подходов к описанию адронных процессов с характерными передачами импульса порядка энергетического масштаба сильных взаимодействий, то есть в субГэВной области. Описания процессов рождения известных мезонов и барионов во многом опираются на собранные экспериментальные данные. Получение аккуратных предсказаний для гипотетических частиц с такими массами относится к новому классу теоретических задач, интерес к которым возрос в последние годы. Диссертация представляет собой серию одних из первых работ в этом направлении.

Диссертация состоит из введения, трёх глав основного текста, заключения, списка использованных литературных источников и приложения в четырёх частях. Во введении приведён беглый обзор темы и продемонстрирована актуальность проведённых исследований. В первой главе рассматривается рождение гипотетических векторных бозонов в процессе упругого рассеяния протонов высокой энергии на фиксированной мишени. Упругое рассеяние описано в приближении обмена эффективной векторной частицей (векторным помероном) между протонами, а интересующая гипотетическая частица испускается налетающим протоном до или после взаимодействия через померон. В результате удаётся для дифференциального сечения рождения парафотона получить формулу в виде свёртки полного сечения упругого рассеяния протонов с фактором, отвечающим за испускание парафотона протоном по аналогии с испусканием фотона в электрон-протонном рассеянии, описываемом в приближении Вайцеккера–Вильямса. Полученный результат оказался действительно численно очень близок к тому, что даёт это приближение для процесса тормозного излучения парафотона в протон-протонном рассеянии, но позволяет также учесть обмен ненулевым импульсом между протонами, что даёт корректную оценку для углового распределения вылетающих массивных векторов. Для феноменологических приложений существенно, что полученный ответ численно оказался на пару порядков меньше, чем широко используемая оценка Блюмляйна и Брюннера, предъявленная ими без достаточного обоснования и теоретического вывода. На её основе, к сожалению, в литературе получено много оценок чувствительностей различных экспериментальных проектов по поиску лёгких векторных частиц и поставлены ограничения на параметры этих моделей. Отмечу, что полученная в первой главе диссертации оценка согласуется с опубликованными другой группой результатами, полученными в альтернативном подходе. Численные оценки приведены для пучков с энергиями 30 ГэВ (T2K), 70 ГэВ (У-70), 120 ГэВ (DUNE) и 400 ГэВ (SHiP).

Во второй главе изучается рождение парафотонов в ходе неупругого тормозного рассеяния высокоэнергичного протона на фиксированной мишени. Процесс описан с использованием формализма функций расщепления,

парафотон испускается налетающим протоном прямо перед неупругим рассеянием на протоне мишени. Дифференциальное сечение рассеяния удалось связать с полным протон-протонным сечением рассеяния, при этом часть фазового объема вырезается вводимыми формфакторами, поскольку там не работают используемые при выводе формул приближения. Неупругое протон-протонное сечение больше упругого, поэтому этот канал рождения доминирует в рождении парафотонов с массами около 1 ГэВ. Поскольку парафотон смешивается с обычным фотоном, при его рождении можно ожидать резонансных усилений для масс в области масс адронных векторных резонансов. Для их учёта используются протонные электромагнитные формфакторы Дирака и Паули. Надо отметить, что второй формфактор в литературе не использовался для этой задачи до работ диссертанта. В них была показана его важность: численные результаты для сечения рождения изменяются вплоть до пары порядков. К сожалению, для интересной области масс парафотона в литературе нет консенсуса по реалистичным величинам формфакторов: различные оценки приводят к различным ответам в том числе для областей чувствительности экспериментов T2K, DUNE, SHiP. Думаю, что данная работа послужит мотивацией для аккуратного вычисления электромагнитных формфакторов протона в нужной для рассматриваемого феноменологического приложения области виртуальности фотона. В третьей главе вычислено тормозное излучение парафотона энергичным пионом при неупругом рассеянии на протоне мишени. Задача непосредственно интересна как для экспериментов с первичным пионным пучком, например NA64h, так и для всех экспериментов с протонными пучками, поскольку учитывает вклад в рождение парафотонов от рассеяния в мишени вторичных пионов, возникающих при рассеянии протонных пучков на фиксированной мишени. Вычисление проведено с использованием формализма функций расщепления, и опирается на экспериментальное измерение дифференциального неупругого пион-протонного сечения рассеяния. Аналогично случаю протон-протонного рассеяния, часть фазового объёма, где не выполняются сделанные приближения, вырезается, в том числе с использованием адронных формфакторов. Испускание парафотона может быть усилено близкими адронными резонансами, для их учёта используется пионный электромагнитный формфактор. Вычисление является первым в литературе: ранее использованное приближение киральной теории возмущений не обосновано для выбранной кинематики пучков и даёт противоречащие измерениям результаты для пион-протонного рассеяния.

Кандидатская диссертация Екатерины Андреевны Крюковой «Гипотетические векторные частицы массой порядка массы лёгких адронов в экспериментах с адронным пучком на фиксированной мишени» даёт отличный пример теоретической работы в области адронной физики, физики сильных взаимодействий, с непосредственным и актуальным приложением к работающим и строящимся экспериментам по поиску новых векторных частиц – парафотонов. Нетривиальность работы состоит в ограниченной возможности опереться на имеющиеся экспериментальные результаты из физики сильных

взаимодействий. Полученные в диссертации результаты чётко сформулированы, на основании аналитических формул получены численные приближения для актуальных в экспериментальных приложениях величин, которые уже используются для получения оценок коллаборациями. Диссертант является независимым молодым учёным, ею непосредственно предложены способы получения новых аналитических результатов и выведены все приведённые в работе формулы. Представленная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям. Считаю, что её автор несомненно заслуживает ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — теоретическая физика.

13 апреля 2026 г.

Научный руководитель,
главный научный сотрудник ОТФ ИЯИ РАН,
д.ф.-м.н, чл.-корр. РАН

Горбунов Д.С.

Подпись Горбунова Д.С. удостоверяю.
Заместитель директора по научной работе ИЯИ РАН,
д.ф.-м.н, чл.-корр. РАН

Рубцов Г.И.