

ОТЗЫВ

официального оппонента Рамазанова Сабира Рамазановича на диссертационную работу Ворончихина Ильи Вячеславовича на тему «Рождение медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика

Поиск частиц темной материи уже несколько десятилетий является одной из приоритетных задач в физике высоких энергий и космологии. Хотя только гравитационные проявления темной материи были обнаружены на данный момент, есть веские аргументы полагать, что она обладает также негравитационными взаимодействиями с частицами Стандартной Модели, которые необходимы (в широкой области масс частиц темной материи) для производства темной материи в ранней Вселенной. В данной диссертации основной упор сделан на исследование частиц с массами меньше ГэВ (это примерно соответствует массе протона), что очень хорошо мотивировано с точки зрения ненаблюдения более тяжелых частиц, так называемых слабо взаимодействующих массивных частиц (WIMPs) в экспериментальных данных. Ключевым элементом в диссертации Ворончихина И. В. является предположение о наличии медиаторов, так называемых посредников во взаимодействии частиц Стандартной Модели и темной материи, что мотивировано с точки зрения нулевого результата прямых поисков темной материи и активно обсуждается в литературе. Также в диссертации рассмотрен достаточно широкий ассортимент медиаторов, представленных скалярными и тензорными частицами, и темной материи, представленной фермионными, скалярными и векторными частицами. Это все однозначно обосновывает актуальность данной работы. Все же решающим показателем ее актуальности является возможность проверки рассмотренных моделей в имеющихся и планируемых экспериментах, в первую очередь в экспериментах с фиксированной мишенью: NA64, LDMX. Это позволяет поставить ограничения на параметры моделей в случае ненаблюдения процессов с частицей медиатора в конечном состоянии. Результаты, обсуждаемые в диссертации, новые, если явно не оговорено обратное, и были опубликованы Ворончихиным И. В. в одном из ведущих научных журналов Physical Review D.

Достоверность результатов, приведенных в диссертации, обеспечена тем, что они получены на основе апробированных аналитических и численных методов, в частности с использованием пакетов Wolfram Mathematica. Результаты прошли

рецензирование в известном журнале Physical Review D и были представлены на различных российских и международных конференциях.

Общая характеристика диссертации

Диссертация очень хорошо структурирована и самосогласованна. Она состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 135 страницы, включая 12 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 225 наименований.

Во **введении** ясно обозначена мотивация диссертации, изложена научная ценность проделанной работы, указаны статьи по теме и подчеркнут личный вклад автора.

В первой главе приведены основные доводы в пользу существования темной материи, полученные на основе изучения плоских галактических кривых, космического микроволнового фона, гравитационного линзирования и анализа динамики кластера Пули (Bullet cluster). В этой главе детально разобраны модели темной материи, которые исследуются в данной диссертации, в частности структура взаимодействия медиатора с частицами темной материи и с лептонами. Там же после краткого обзора космологической модели Вселенной описан механизм генерации темной материи (freeze-out).

Во второй главе рассматривается кинематика процессов рождения медиаторов на тяжелых ядрах. Данные процессы включают виртуальный фотон, и в диссертации подробно описано взаимодействие фотона с адронным током. В частности, детально рассмотрены различные форм-факторы, характеризующие адронный ток. Приведено вычисление процессов с рождением медиатора на древесном уровне и в приближении Вайцзеккера-Вильямса. Также приведено вычисление сечений аннигиляции в темную материю через медиатор, что необходимо для вычисления современной плотности энергии темной материи.

Третья глава начинается с краткого описания экспериментов с фиксированной мишенью: NA64e, NA64mu, LDMX и M^3 , релевантные для поиска медиаторов в рассеянии на ядрах, описанном в предыдущей главе. Приведено сравнение сечений рассеяния на ядрах, полученных в древесном подходе и в подходе Вайцзеккера-Вильямса. Далее приведены ограничения, следующие из остаточной плотности темной материи и указанных экспериментов. Эта глава является, пожалуй, самой важной, так как в ней подробно описаны новые научные результаты, полученные автором диссертации.

В заключительной главе приведены основные результаты диссертации.

Также в диссертации имеется приложение, в котором приведены детали вычисления матричных элементов.

Отсутствуют претензии к основным результатам, полученным в диссертации, и к тем методам, которые были использованы для их получения. Есть небольшие замечания/пожелания.

1. Поле со спином 2, которое рассматривается в диссертации в качестве медиатора темной материи, давно и активно обсуждается в литературе в контексте модифицированной гравитации. В частности, обсуждаются проблемы, связанные с моделью Фирца-Паули, например нестабильность Бульвара-Дезера, возникающая в пространстве-времени, отличном от плоского. Данная нестабильность требует обсуждения, особенно учитывая, что расширение Вселенной имеет критическое значение для эволюции темной материи. Возможно, стоило бы упомянуть модель массивной гравитации де Рам-Габададзе-Толли, в которой удастся избавиться от проблемы с нестабильностью Бульвара-Дезера.

2. Не рассмотрена космологическая эволюция, соответствующая частицам медиатора. Это могло бы быть интересно потому, что ожидается, что таких частиц было много в ранней Вселенной и они распадались в частицы темной материи.

Такой процесс вполне мог бы привести к дополнительному вкладу в современную плотность темной материи, который в принципе мог бы конкурировать с основным вкладом за счет механизма freeze-out (вымораживания). Вероятно, этот дополнительный вклад замывается потому, что частицы темной материи находятся в термальном равновесии с плазмой на момент распада медиатора, однако краткий анализ данной ситуации не был бы лишним.

3. Мне кажется, было бы интересно расширить литературу, в частности, упомянуть случаи, когда само поле спина 2 играет роль темной материи. Также существует достаточно обширная литература по частицам темной материи с массой меньше ГэВ.

4. Обзор механизмов производства темной материи во введении несколько поверхностен и не совсем точен. Во-первых, механизм вымораживания (freeze out) не обязательно предполагает наличие медиатора, а именно такое впечатление складывается из дискуссии во введении. В случае механизма вмерзания (freeze in) стоило бы отметить, что в этом случае частицы темной материи не достигают теплового равновесия в ранней Вселенной. Также можно было бы упомянуть

сверхлегкую темную материю (например, аксионы) и механизмы их производства.

5. Серьезных опечаток в тексте диссертации не обнаружено, но все же стоит отметить некоторые стилистические недочеты, например, встречаются обороты “свидетельства темной материи”, “рассматривается поведение минимального значение виртуальности переданного фотона”.

6. В первой главе очень поверхностно изложено влияние темной материи на спектр космического микроволнового фона, в частности структуру его пиков. Нет упоминания данных Planck в основном тексте (хотя имеется ссылка на Planck).

7. Не очень понятна мотивация раздела 1.3.2.1, в которой описана пятиместная модель Рэндалл-Сундрум. Остается неясной связь этого раздела с основным изложением в диссертации.

8. В данной работе рассматривается связь медиатора только с одним лептонным ароматом. Как указано на странице 37, такое предположение приходится сделать во избежание проблемы с нарушением лептонно-флэйворами токами. Эту дискуссию стоило бы расширить и уточнить, тем более учитывая схожесть поля спина-2 с гравитоном и то, что последний универсально связан с полями материи. В частности, было бы интересно увидеть ограничения на константу связи с электронами/мюонами, возникающими из ограничений на нарушение лептонно-флэйворами токов и обсуждение возможных источников иерархии между константами.

Тем не менее, указанные замечания **никоим образом не снижают общую научную ценность работы**, достоверность и важность полученных автором результатов.

В заключение стоит отметить, что диссертация Ворончихина И.В. выполнена на высоком профессиональном уровне, она хорошо мотивирована, содержит новые научные результаты в интересной области исследований, посвященной поиску частиц за пределами Стандартной Модели. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Достоверность и степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений.

Диссертация Ворончихина Ильи Вячеславовича полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор безусловно

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

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук

по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика,

ведущий научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего образования

Московского Государственного Университета им. М. В. Ломоносова,

Институт теоретической и математической физики

(ИТМФ МГУ)

119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1.

Телефон: +7 (985) 082-47-77

Адрес электронной почты: ramazanov@itmp.msu.ru

Рамазанов Сабир Рамазанович

30.05.2025

Подпись сотрудника МГУ имени М.В. Ломоносова, ИТМФ,

С.Р. Рамазанова удостоверяю:

Заместитель директора ИТМФ МГУ

Телефон: +7 (917) 520-82-64

Адрес электронной почты: levkov@itmp.msu.ru.

Дмитрий Геннадьевич Левков

Сведения об оппоненте

Рамазанов Сабир Рамазанович, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Телефон: +7 (985) 082–47-77, Адрес электронной почты: ramazanov@itmp.msu.ru.

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

1. Рамазанов С. Р. Beyond freeze-in: Dark matter via inverse phase transition and gravitational wave signal. // Phys. Rev. D. – 2022. – Vol. 105. – No. 6. – P. 063530.
2. Рамазанов С. Р. Gravitational shine of dark domain walls.// JCAP. – 2022. – Vol. 04. – No. 04. – P. 028.
3. Рамазанов С. Р. Shimmering gravitons in the gamma-ray sky. // JCAP. – 2023. – Vol. 06. – P. 019.
4. Рамазанов С. Р. NANOGrav spectral index $\gamma=3$ from melting domain walls. // Phys. Rev. D. – 2023. – Vol. 108. – No. 12. – P. 123529.
5. Рамазанов С. Р. Observing primordial magnetic fields through Dark Matter. // JCAP. – 2021. – Vol. 02. – P. 011.