

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **19.06.2025** г. № **31/9**

О присуждении **Ворончихину Илье Вячеславовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Рождение медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью» по специальности 1.3.3 — «Теоретическая физика» принята к защите 13.02.2025 г., протокол № 24/2 диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Ворончихин Илья Вячеславович 1996 года рождения. В 2020 году соискатель освоил программу магистратуры с отличием Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению подготовки 14.04.02 — «Ядерная физика и технологии», (диплом 107004 0016429, выданный 06.07.2020 г.). В 2024 году окончил аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия по специальности 01.04.02 (1.3.3) – «Теоретическая физика» (диплом 107031 0727199, выданный 30.06.2024 г.). В настоящее время работает в должности техника, Отделение математики и математической физики Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Диссертация выполнена в Исследовательской школе физики высокоэнергетических процессов, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Кирпичников Дмитрий Викторович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел теоретической физики, и.о. заместителя заведующего отделом, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Арбузов Андрей Борисович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики имени Н. Н. Боголюбова, Научный отдел теории фундаментальных взаимодействий, начальник сектора № 5,

Рамазанов Сабир Рамазанович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Институт теоретической и математической физики, ведущий научный сотрудник, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», (г. Гатчина) в положительном заключении, подписанном Кимом Виктором Тимофеевичем, доктором физико-математических наук, заместителем руководителя Отделения физики высоких энергий, и утвержденном заместителем директора НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ Максимовым Владимиром Исааковичем,

указала, что работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24

сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Ворончихин Илья Вячеславович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Соискатель имеет 3 опубликованные работы по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны при решающем участии соискателя.

Список основных работ по результатам диссертационного исследования:

1. Voronchikhin I.V., Kirpichnikov D.V. Probing hidden spin-2 mediator of dark matter with NA64e, LDMX, NA64 μ , and M3 // Phys. Rev. D. – 2022. – Vol. 106, No. 11. – Article no. 115041. DOI: 10.1103/PhysRevD.106.115041.

2. Voronchikhin I.V., Kirpichnikov D.V. Resonant probing spin-0 and spin-2 dark matter mediators with fixed target experiments // Phys. Rev. D. – 2023. – Vol. 107, No. 11. – Article no. 115034. DOI: 10.1103/PhysRevD.107.115034.

3. Voronchikhin I.V., Kirpichnikov D.V. Probing scalar, Dirac, Majorana, and vector dark matter through a spin-0 electron-specific mediator at electron fixed-target experiments // Phys. Rev. D. – 2024. – Vol. 109, No. 7. – Article no. 075012. DOI: 10.1103/PhysRevD.109.075012.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация обладает внутренним единством, содержит важные физические и методические результаты, имеющие большое научное значение и ценность. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации и наличием работ высокого научного уровня по близкой тематике.

В отзывах оппонентов и ведущей организации были высказаны следующие критические замечания и пожелания:

- 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.

- 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.

- 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.

- 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.

- 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).

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

- В работе рассматривается связь медиатора только с одним лептонным ароматом. Как указано на странице 37, такое предположение приходится сделать во избежание проблемы с нарушением лептонно-флэйворными 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-флэйворных токов и обсуждение возможных источников иерархии между константами.

- На стр. 49 после Ур. (2.15) говорится, что для векторов поляризации фотона с разными индексами (μ и ν) и аргументами (q и k) одновременно используется две разных калибровки. Такой выбор требует обоснования и обсуждения. Более того, непонятно, какая калибровка использована для конкретного вектора поляризации, входящего в Ур. (2.15).

- В диссертации подробно обсуждаются случаи скалярного и тензорного медиатора. При этом в литературе ранее детально исследовался случай векторного медиатора. Следовало провести сравнение этих случаев между собой.

- Одним из результатов диссертации заявлен анализ эффектов, связанных с атомными и ядерными электромагнитными форм-факторами. Этот вопрос заслуживает отдельного теоретического и экспериментального анализа. В диссертации следовало бы не просто оценить эффект за счет выбора разных форм-факторов, но и обосновать предпочтительный выбор той или иной параметризации.

- Не понятно, почему основной анализ экспериментальных данных для процесса тормозного излучения медиатора был проведен в итоге в приближении Вайцзеккера-Вильямса, а не в более точном древесном приближении, которое также использовалось автором.

- Нужно заметить, что при довольно ясном, несмотря на сжатость, описании установок NA64e и NA64μ эксперимента NA64 опущен тот факт, что они являются в своем роде уникальными. Это впервые полностью реализованная концепция Active Dump Target, когда мишень для полной остановки частиц пучка является еще и детектором (электромагнитным калориметром), разработанная совместно группами ИЯИ РАН, ОИЯИ и Университета Андреса Белло, Сантьяго.

- В тексте диссертации присутствуют некоторые стилистические недостатки и опечатки. В частности, опечатки в словах «Вселенная» на стр. 24, «несохраняющихся» на стр. 37, «пропагатор» (там же далее проблема с падежом) на стр. 40, «Мёллер» на стр. 50, «предливневая» на стр. 70, «низкоэнергетический» на стр. 73, «статистика» на стр. 93, 98, «майорановская» на стр. 99 и т.п., также имеется проблема с запятыми. В некоторых местах имеется фрагментарность изложения, а введение терминов «термальные мишени» и «реликтовые кривые» для обозначения на графиках полученных линий с использованием характерных зависимостей между массой частицы легкой Темной материи и константами взаимодействия скалярного медиатора с электроном, при которой достигается наблюдаемая реликтовая плотность Темной материи, больше напоминает слэнг. Фамилию известного американского физика Тсяя в русскоязычной литературе принято склонять по падежам. Еще, например, на стр. 28 упоминается «аннигиляция в видимый сектор темной материи», встречаются обороты “свидетельства темной материи”, “рассматривается поведение минимального значение виртуальности переданного фотона”.

В целом, диссертация написана четким и понятным языком, но не лишена небольшого количества опечаток, грамматических и стилистических ошибок. Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Соискатель Ворончихин И.В. ответил на заданные в ходе защиты вопросы и высказанные замечания.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Получены ограничения на константу связи тензорного медиатора и заряженного лептона Стандартной модели в невидимой моде экспериментов NA64e, NA64μ, LDMX и M3 на основе процесса рождения медиатора при рассеянии лептонов на ядрах мишени в диапазоне масс легкой темной материи.

- Получены ограничения на константу связи электрона и тензорного медиатора в случае дираковской и скалярной темной материи из экспериментов NA64e и LDMX на основе процесса аннигиляции вторичных позитронов на атомных электронах мишени.

- Показано слабое влияние различных моделей параметризации упругих атомных форм-факторов на ограничения на константу связи тензорного медиатора и заряженного лептона Стандартной модели при рассеянии заряженного лептона в поле ядер мишени в диапазоне масс легкой темной материи.

- Получены ограничения на константу взаимодействия скалярного медиатора темной материи и электрона из невидимой моды экспериментов NA64e, LDMX в предположении отсутствия сигнала рождения такого медиатора при рассеянии заряженного лептона в поле ядер мишени.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Найдено пространство параметров феноменологически приемлемых сценариев новой физики за пределами Стандартной модели фундаментальных взаимодействий, предлагающих решение проблемы темной материи. Полученные оценки ограничений могут быть использованы в планируемых и проводимых в настоящее время экспериментах с фиксированной мишенью.

Оценка достоверности результатов показала, что результаты диссертации получены с использованием методов современной теоретической физики, в частности, квантовой теории поля и космологии. Полученные соискателем выводы не противоречат результатам работ других исследователей. Основные результаты диссертации прошли апробацию на научных конференциях и

семинарах, в том числе международных. Таким образом, результаты диссертации обоснованы и достоверны.

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя во всех опубликованных работах по теме диссертации является определяющим.

На заседании 19 июня 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Ворончихину Илье Вячеславовичу ученую степень кандидата физико-математических наук за получение новых ограничений на пространство параметров моделей легкой темной материи в случае скалярного и тензорного медиаторов в экспериментах с фиксированной мишенью.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве **21** человека, из них **5** докторов наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика, участвовавших в заседании, из **27** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: **за - 21**, **против - 0**, **недействительных бюллетеней - 0**.

Председатель
диссертационного совета 24.1.163.01
доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

_____ Кравчук Л.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01
кандидат физ.-мат. наук

_____ Демидов С.В.

19.06.2025 г.

М.П.