

ОТЗЫВ

официального оппонента Арбузова Андрея Борисовича 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

Диссертационная работа И.В. Ворончихина посвящена изучению возможности обнаружения новых частиц, являющихся переносчиками взаимодействия между частицами Стандартной модели (СМ) и частицами темной материи. Поиск частиц такого типа является одной из **актуальных** задач современной физики элементарных частиц. Актуальность данного направления исследований также связана с тем, что поиски таких частиц ведутся на нескольких существующих и будущих экспериментальных установках. То, что Стандартная модель не является полной фундаментальной теорией на сегодняшний день считается установленным фактом, и это обуславливает интерес к моделям, расширяющим СМ. Те модели, которые рассмотрены в диссертации являются достаточно естественными и хорошо мотивированными вариантами выхода за рамки СМ. Полученные в диссертации результаты являются **новыми**, они вносят вклад в продвижение поисков новых физических явлений в физике элементарных частиц. Полученные ограничения на пространство допустимых параметров моделей новой физики позволяют отсекаать отдельные модели и вести дальнейшие поиски в наиболее перспективных направлениях, что особо важно для планирования новых экспериментов. Результаты востребованы научным сообществом и уже использованы для анализа и интерпретации данных эксперимента NA64, проходящего в ЦЕРН.

Достоверность полученных результатов обеспечена тем, что применялись надёжные современные методы квантовой теории поля и космологии. Для трудоёмких вычислений использовалась компьютерная система Wolfram Mathematica и специализированные пакеты к ней. Также достоверность подтверждается тем, что результаты были опубликованы в ведущем рецензируемом журнале, относящемся к первому квартилю (Q1).

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения. Полный объём диссертации составляет 127 страницы, включая 12 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 217 наименований.

Во **введении** убедительно обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель, поставлены задачи, изложена научная новизна и практическая значимость настоящей работы. Обоснована достоверность полученных результатов. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней дана полезная информация о свидетельствах в пользу существования темной материи и о типичных моделях, ее описывающих. Также в этой главе введены эффективные лагранжианы, которые будут использованы для получения основных результатов диссертации. Эти лагранжианы описывают взаимодействие лептонов Стандартной модели через скалярный или тензорный медиатор с частицами темной материи разного спина. Показано также, как свойства медиатора могут сказаться на реликтовой плотности темной материи разного типа, что в свою очередь окажет влияние на интерпретацию результатов анализа экспериментальных данных в последующих главах.

Во **второй главе** достаточно подробно описана процедура вычисления сечений процессов образования искомых медиаторов с последующим их распадом в легкие частицы темной материи. Процесс тормозного излучения медиатора рассмотрен в двух приближениях: Вайцеккреа-Вильямса и древесном. Одним из полезных результатов диссертации является сравнение результатов, получаемых в этих приближениях. Также представлена процедура вычисления сечения процесса аннигиляции вторичных позитронов с электронами мишени в частицы темной материи через медиатор. Представлены явные выражения для дифференциальных сечений, что важно для их последующего использования при анализе экспериментальных данных. Проанализированы кинематические ограничения, что позволило определить доступный для исследования диапазон масс медиаторов. Вычисления проведены аккуратно с использованием стандартных хорошо отработанных методов квантовой теории поля.

Третья глава содержит результаты по выводу ограничений на пространство параметров лёгкой термальной темной материи на основе анализ экспериментальных данных. Проанализирована общая ситуация с существующими и будущими экспериментами по рассеянию лептонов на фиксированной мишени. Изучена зависимость от выбора модели, описывающей форм-факторы мишени. Показаны кривые для реликтовой темной материи, которую можно было бы получить в ранней вселенной за счет взаимодействия электронов с рассмотренными в диссертации медиаторами. С учетом экспериментальных условий найдена оценка числа сигнальных событий при тормозном излучении медиатора на атомах мишени и при аннигиляции вторичных позитронов. Результаты третьей главы, на мой взгляд, являются наиболее ценными и интересными с научной точки зрения.

В **приложении** приведены полезные формулы для матричных элементов рассмотренных процессов. Для их получения использовались современные компьютерные методы.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

Диссертация написана достаточно подробно с приведением всех необходимых формул, деталей вычислений и экспериментального анализа обсуждаемых наблюдаемых величин. По содержанию диссертации есть следующие **замечания**.

1. В целом диссертация написана ясно и грамотно, но в тексте присутствует некоторое количество опечаток и неточностей, например, фамилию известного американского физика Тсая в русскоязычной литературе принято склонять по падежам. Еще, например, на стр. 28 упоминается «аннигиляция в *видимый* сектор темной материи».

2. 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).

3. 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.

4. 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.

5. 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.

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

Диссертация Ворончихина И.В. представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне. Результаты диссертации являются **новыми** и оригинальными, они с достаточной полнотой опубликованы в ведущих реферируемых научных журналах, неоднократно **апробировались** на международных и российских рабочих совещаниях и конференциях. **Достоверность и степень обоснованности** научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывают сомнений. **Вклад автора** является определяющим в результатах работ, составляющих основу диссертации. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация Ворончихина Ильи Вячеславовича полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного

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

доктор физико-математических наук

по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика,

профессор РАН, руководитель сектора № 5

Научного отдела теории фундаментальных взаимодействий

Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова

Международной межправительственной организации

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ),

141980, Россия, Московская Область, г. Дубна, ул. Жолио- Кюри, 6.

Телефон: +7 (496) 216-33-43

Адрес электронной почты: arbuzov@theor.jinr.ru.

Арбузов Андрей Борисович

06.05.2025

Подпись сотрудника ЛТФ им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ

А.Б. Арбузова удостоверяю:

учёный секретарь

ЛТФ им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ

Телефон: +7 (496) 216-50-88

Адрес электронной почты: andreev@theor.jinr.ru.

А.В. Андреев

Сведения об оппоненте

Арбузов Андрей Борисович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика, профессор РАН.

Телефон: +7 (496) 216-33-43, Адрес электронной почты: arbuzov@theor.jinr.ru.

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

1. Арбузов А. Б. Higher-order NLO radiative corrections to polarized muon decay spectrum. // Phys. Rev. D. – 2024. – Vol. 109. – No. 5. – P. 053001.
2. Арбузов А. Б. Electroweak radiative corrections to polarized top quark pair production. // Phys. Rev. D. – 2023. – Vol. 107. – No. 11. – P. 113006.
3. Арбузов А. Б. Electroweak effects in polarized muon-electron scattering. // Phys. Rev. D. – 2022. – Vol. 105. – No. 3. – P. 033009.
4. Арбузов А. Б. Effects of Electroweak Radiative Corrections in Polarized Low-Energy Electron Positron Annihilation into Lepton Pairs. // JETP Lett. – 2022. – Vol. 116. – No. 4. – P. 199.
5. Арбузов А. Б. Static Casimir Condensate of the Bispinor Field in the Friedmann Universe. // JETP Lett. – 2022. – Vol. 115. – No. 7. – P. 377.