«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В.И. Максимов

1 июня 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ) на диссертацию Ворончихина Ильи Вячеславовича «Рождение медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. - Теоретическая физика.

В настоящее время наиболее успешной фундаментальной теорией является Стандартная модель (СМ) элементарных частиц и их взаимодействий. На сегодняшний день не обнаружено ни одного значимого расхождения от предсказаний СМ в пределах точности проведенных экспериментов. С другой стороны, многочисленность параметров СМ и не включение в ее рамки гравитации, эффектов Темной материи и Темной энергии Вселенной свидетельствуют о том, что она не является окончательной фундаментальной теорией.

Основные надежды на прямое обнаружение Новой физики за пределами СМ сейчас связаны с Большим адронным коллайдером (БАК), с планируемыми будущими ускорителями на более высоких энергиях (СЕРС, FCC) или на ускорителях с большими интенсивностями (эксперименты ВаВаг, E137, LDMX и M³ в СЛАК, Belle II в КЕК, NA62, NA64 и SHiP в ЦЕРН и др.). Наряду с ними, важную роль играют неускорительные эксперименты (DAMA, CDMS, Pier Auger, ICESUBE, БАЙКАЛ и др.). Имеются также подходы, направленные на прецизионные измерения свойств известных частиц или взаимодействий СМ (g-2 и др.) для поисков не прямых проявлений Новой физики. К сожалению, на данный момент исследования на БАК и других ускорителях не предоставляют значимых наблюдений проявления Новой физики, а имеющиеся указания на отклонение предсказаний СМ от экспериментальных измерений, например, аномального магнитного момента мюона и массы W-бозона или косвенные (непрямые), например, наличие Темной материи и Темной энергии Вселенной, требуют независимого или прямого подтверждения.

Для исследования сектора Темной материи, в особенности, перспективными, являются поиски указаний на наличие частиц (медиаторов), осуществляющих взаимодействие частиц Стандартной модели с частицами Темного сектора. Поиск таких медиаторов, в настоящее время, является одной из **актуальных** задач современной физики элементарных частиц и космологии. Поэтому, тематика представленной диссертационной работы Ворончихина Ильи Вячеславовича, где основной целью является изучение пространства параметров моделей Темной материи при поиске медиаторов Темного сектора в установках NA64e на пучке электронов и NA64μ на пучке мюонов в эксперименте NA64 с фиксированной мишенью, проводимых на ускорителе СПС в ЦЕРН в настоящее время, и в будущих экспериментах Light Dark Matter Experiment (LDMX) с пучком электронов и Muon Missing Momentum (M³) с пучком мюонов в СЛАК, является, без сомнения, весьма актуальной.

Для достижения поставленной цели автором решались следующие основные задачи:

1. Получение ограничений на константу взаимодействия лептона и тензорного медиатора Темной материи при торможении заряженного лептона в поле тяжелых ядер фиксированной мишени для различных моделей атомных и ядерных форм-факторов;
2. Нахождение ограничения на константу взаимодействия скалярного и тензорного медиаторов с электроном при аннигиляции вторичных позитронов в мишени для электронного и позитронного первичных пучков для различных типов Темной материи;
3. Получение зависимости константы взаимодействия скалярного медиатора с электроном от массы медиатора для наблюдаемой в настоящий момент плотности Темной материи во Вселенной для дираковской, майорановской, скалярной и векторной термальной Темной материи. Оценка чувствительности экспериментов NA64e и LDMX в области параметров моделей соответствующих типов частиц Темной материи.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и перечня цитируемой литературы, содержащего 225 наименований. Общий объем диссертации составляет 135 страниц с 12 рисунками и 2 таблицами.

Введение содержит краткую характеристику темы исследования и обоснование ее актуальности, формулировку цели и направлений работы, обсуждение новизны и значимости результатов, методов исследований и апробацию работы.

В первой главе дается обзор основных экспериментальных наблюдений, мотивирующих введение скрытой массы Вселенной и дающих ограничения на параметры для легкой термальной Темной материи и необходимых для нее медиаторов. Приводится методика расчета реликтовой плотности для Темной материи, позволяющей в комбинации с экспериментами получать ограничения на различные типы легкой Темной материи и ее медиаторов. Рассмотрены эффективные лагранжианы взаимодействия для скалярного и тензорного медиаторов скрытого сектора в случае взаимодействия с заряженным лептоном.

Вторая глава содержит формулы для расчета дифференциального сечения рождения скалярного и тензорного медиаторов скрытого сектора на тяжелом ядре в приближении Вайцзеккера-Вильямса и полного расчета в древесном приближении. Обсуждены основные модели ядерных и атомных форм-факторов и изучены влияние экранирования атомными электронами и форм-факторов на соответствующий поток виртуальных фотонов. Получены ширины распада медиатора и полные сечения для процессов аннигиляции вторичных позитронов на атомных электронах мишени и механизма аннигиляции Темной материи через эффект вымораживания.

В третьей главе рассмотрено влияние моделей упругих атомных форм-факторов на дифференциальное и полное сечения рождения медиатора в поле тяжелых ядер в приближении Вайцеккера-Вильямса для экспериментов с фиксированной мишенью. Получены ограничения и оценки чувствительности для константы взаимодействия скалярного и тензорного медиаторов скрытого сектора при торможении заряженного лептона в поле тяжелых ядер фиксированной мишени в экспериментах с лептонными пучками. Получены ограничения на константу взаимодействия скалярного и тензорного медиаторов Темной материи при аннигиляции вторичных позитронов в мишени для электронного и позитронного первичного пучка. Получены реликтовые кривые для легкой Темной материи в предположении ее термального контакта в ранней Вселенной и скалярного медиатора Темной материи, взаимодействующего преимущественно с электроном.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы. **Приложение** содержит явный вид матричных элементов, ширины распадов и сечений для рассматриваемых процессов.

Основные результаты диссертации, выносимые на защиту:

1. Оценена чувствительность планируемых измерений (LDMX и M3) и получены, в проводимых в настоящее время измерениях на лептонных пучках (NA64e и NA64 μ) в эксперименте NA64, ограничения для взаимодействия тензорного медиатора и соответствующего лептона на основе предположения об отсутствии сигнальных событий рождения медиатора скрытого сектора в поле ядер мишени при торможении лептона. Полученные ограничения измерений NA64e при статистике 9.37×10^{11} электронов, накопленных на мишени, не достигают существующих пределов из эксперимента BaBar, но, в случае набора планируемой статистики в 5×10^{12} электронов, эксперимент NA64e позволит улучшить имеющиеся ограничения на пространство параметров моделей Темного сектора в диапазоне $c_{ee}^G \gtrsim 1.4 \times 10^{-4} \text{ GeV}^{-1}$. Планируемая статистика измерений эксперимента LDMX в 10^{15} электронов, может улучшить чувствительность до уровня $c_{ee}^G \gtrsim 3 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1}$. Аналогично, эксперимент NA64 μ обладает чувствительностью к взаимодействию тензорного медиатора и мюона в диапазоне $c_{\mu\mu}^G \gtrsim 1.15 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1}$ для планируемой статистики в 5×10^{13} мюонов, накопленных на мишени. Также, эксперимент M³ при планируемой статистике 10^{13} мюонов чувствителен к взаимодействию тензорного медиатора и мюона на уровне $c_{\mu\mu}^G \gtrsim 4.7 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1}$.
2. Получены ограничения на взаимодействие электрона и тензорного медиатора Темной материи в экспериментах NA64e и LDMX для процесса аннигиляции вторичных позитронов на атомных электронах мишени через медиатор Темной материи в случае дираковской и скалярной Темной материи. Константа взаимодействия тензорного медиатора и Темной материи использовалась в виде $c_{DM DM}^G \approx 1 \text{ ГэВ}^{-1}$. В частности, для тензорного медиатора и электрона в случае эксперимента NA64e со статистикой 9.37×10^{11} электронов, накопленных на мишени, происходит незначительное усиление ограничений из эксперимента NA64e до уровня $c_{ee}^G \gtrsim 1.2 \times 10^{-4} \text{ GeV}^{-1}$ в соответствующей области масс, которое не приведет к заметному улучшению имеющегося ограничения эксперимента BaBar. Однако, в случае экспериментов NA64e и LDMX планируемая позитронная мода пучка позволит улучшить ограничения в разы относительно ограничений, основанных на процессе рождения

медиаторов при торможении первичного пучка в поле ядра мишени, что указывает на перспективность позитронного первичного пучка.

3. Показано незначительное влияние выбора существующих моделей параметризации упругих атомных форм-факторов на величину сечения рождения медиатора скрытого сектора в поле тяжелых ядер мишени планируемых (LDMX и M^3) и проводимых в настоящее время (NA64e и NA64 μ) экспериментов для диапазона масс $1 \text{ МэВ} \lesssim m_{\text{MED}} \lesssim 1 \text{ ГэВ}$. Для масс медиатора $m_{\text{MED}} \lesssim 400 \text{ МэВ}$ в случае хельмовского и экспоненциального форм-факторов по отношению к форм-фактору Тсай-Шиффа относительная разница для полных сечений составляет $\lesssim 5 \%$. Также, для масс $400 \text{ МэВ} \lesssim m_{\text{MED}} \lesssim 1 \text{ ГэВ}$ соответствующая относительная разница полных сечений для экспериментов NA64e и NA64 μ составляет $\lesssim 5 \%$ и, аналогично, для экспериментов LDMX и M^3 получена оценка $\lesssim 30 \%$.
4. Показано, что эксперимент NA64e для скалярного медиатора, взаимодействующего преимущественно с электроном, при текущей статистике в 9.37×10^{11} электронов, позволяет исключить дираковскую легкую Темную материю для масс $m_\phi \lesssim 300 \text{ МэВ}$ на уровне достоверности 90% C.L. При этом, эксперимент NA64e с планируемой статистикой в 5×10^{12} электронов, может исключить майорановскую Темную материю. Также, планируемый эксперимент LDMX позволит подтвердить полученные из эксперимента NA64e ограничения на взаимодействие скалярного медиатора и электрона в случае дираковской и майорановской Темной материи.

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в одном из ведущих мировых журналах, являются **новыми** и оригинальными, неоднократно **апробировались** на международных и российских совещаниях и конференциях. **Достоверность** результатов диссертации обуславливается тем, что статьи, составляющие ее основу, были опубликованы в ведущих международных рецензируемых изданиях, использованием автором для их получения широко апробированных в научной практике методов теоретической физики, а также их сравнением там, где это было возможно, с уже известными результатами. **Вклад автора**, непосредственно выполнившего все расчеты исследования, является определяющим в результатах работ, составляющих основу диссертационной работы. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам, а автореферат правильно отражает ее содержание.

Диссертация написана в сжатом, но довольно ясном стиле, и довольно тщательно оформлена. Тем не менее, все же присутствуют некоторые 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.

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.

Конечно, все эти упомянутые недостатки не меняют общей положительной оценки диссертации.

В целом, диссертация Ворончихина И.В. является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Полученные автором результаты, являются заметным шагом в направлении поисков указаний на проявления Новой физики за пределами СМ в виде частиц Темной материи в экспериментах на фиксированной мишени. В сложной ситуации, где требовался тщательный анализ многочисленных факторов, автор продемонстрировал глубокое понимание широкого круга теоретических и феноменологических проблем физики элементарных частиц и космологии.

Диссертация Ворончихина И.В. «Рождение медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью» соответствует всем основным требованиям, предъявляемым ВАК и Минобрнауки РФ к кандидатским диссертациям, а соискатель Ворончихин Илья Вячеславович, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 - Теоретическая физика.

Диссертационная работа Ворончихина И.В. была представлена, обсуждена и одобрена на Объединенном семинаре Отделения физики высоких энергий (ОФВЭ) и Отделения теоретической физики (ОТФ) НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.

01.06.2025

Ким Виктор Тимофеевич
д.ф.-м.н., заместитель руководителя
Отделения физики высоких энергий
Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»
мкн Орлова роща, д. 1, г. Гатчина Ленинградской обл, 188300
тел.: 8 (81371) 4-67-22
e-mail: kim_vt@pnpi.nrcki.ru

Подпись В.Т. Кима заверяю
Ученый Секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

С. И. Воробьев

Сведения о ведущей организации
 по диссертации Ворончихина Ильи Вячеславовича
 «Рождение медиаторов темной материи в экспериментах
 с фиксированной мишенью»
 на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
 по специальности 1.3.3. – «Теоретическая физика».

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ
Организационно правовая форма организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение
Ведомственная принадлежность	Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Место нахождения	Российская Федерация, Ленинградская обл., г. Гатчина
Почтовый индекс, адрес организации	188300, Россия, Ленинградская обл., г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1, НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ
Телефон	Телефон: +7(81371) 4-60-25, Факс: +7(81371) 36025
Адрес электронной почты	dir@pnpi.nrcki.ru
Адрес официального сайта организации в сети Интернет	www.pnpi.nrcki.ru
<p style="text-align: center;">Список основных публикаций в рецензируемых научных изданиях работников структурного подразделения, составляющих отзыв, за последние пять лет по теме диссертации соискателя (не более 15 публикаций):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Kim V.T. <i>Higgs Boson and Naturalness Problem in the Standard Model</i> // Phys. Part. Nucl. 2024. Vol. 55. № 1. P. 145. 2. Egorov A.Iu., Kim V.T. <i>Next-to-leading BFKL evolution for dijets with large rapidity separation at different LHC energies</i> // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. 3. Baldin A.A., ..., Kim V.T. Et al. <i>FLAP Collaboration: Tasks and Perspectives. Study of Fundamentals and New Applications of Controllable Generation of Electromagnetic Radiation by Relativistic Electrons Using Functional Materials</i> // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. Vol. 18. № 3. P. 338. 	

4. Egorov A.Iu., Kim V.T. *Next-to-Leading BFKL for Mueller Navelet Dijets with Large Rapidity Separation and Jet Veto* // Phys. Atom. Nucl. 2023. Vol. **86**. № 6. P. 1461.
5. Abramov V.V., ..., Kim V.T. et al. *Possible Studies at the First Stage of the NICA Collider Operation with Polarized and Unpolarized Proton and Deuteron Beams* // Phys. Part. Nucl. 2021. Vol. **52**. № 6. P. 1044.
6. A. Tumasyan, ..., Kim V. T. et al., *Study of dijet events with large rapidity separation in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV* // JHEP - 2022 - Vol. **03**. P. 189.