

На правах рукописи

Ворончихин Илья Вячеславович

**Рождение медиаторов темной материи
в экспериментах с фиксированной мишенью**

1.3.3 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Научный руководитель:

Кирпичников Дмитрий Викторович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел теоретической физики, и.о. зам.зав. 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 учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Институт теоретической и математической физики, научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: <http://www.inr.ru>.

Автореферат разослан _____

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

Демидов Сергей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Степень разработанности темы исследования

Наиболее успешной моделью для описания природы частиц является Стандартная модель, которая позволяет структурировать взаимодействия и фундаментальные частицы. Однако, Стандартная модель не полностью объясняет все явления, в частности, ускоренное расширение и массовый состав Вселенной. Первые идеи о необходимости введения дополнительной невидимой компоненты материи во Вселенной возникли в 1930-х годах [1] при наблюдении слишком большой дисперсии скоростей галактик в скоплении. Далее, эти идеи окончательно стали частью фундаментальной физики в 1970-х [2] после анализа вращательных свойств объектов в галактиках с широким диапазоном светимости. Кроме того, изучение гравитационного линзирования позволило обнаружить дополнительные эффекты, в частности, то что частицы темной материи достаточно слабо взаимодействуют друг с другом при столкновении двух скоплений [3]. Также, темная материя является важной составляющей для описания крупномасштабной структуры Вселенной [4] и спектра фонового реликтового излучения [5], что, в частности, мотивирует разработку моделей новой физики для тестирования таких сценариев в наземных экспериментах.

Космологическая модель строится на основе уравнения Эйнштейна, которое, в свою очередь, связывает геометрию пространства и содержимое в этом пространстве. Для получения решений уравнения Эйнштейна используются дополнительные условия на метрику из симметрий, в частности, можно использовать не противоречащие наблюдениям симметрии однородности и изотропности пространства на космологических масштабах [6]. Также стоит упомянуть, что согласно наблюдениям Вселенная расширяется по закону Хаббла [7].

В этом случае можно получить соответствующие уравнения Фридмана, которые описывают однородную, изотропную и расширяющуюся Вселенную. На текущий момент стандартным способом описания эволюции Вселенной является модель Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter) [8], где рассматривается холодная темная материя, т.е. частицы темного сектора являются нерелятивистскими, во Фридмановской Вселенной, а ее ускоренное расширение описывается космологической постоянной [9]. Также стоит отметить, что модель Λ CDM может быть дополнена теорией инфляции, т. е. экспоненциальным расширением Вселенной в некоторый период времени [10], что позволяет воспроизвести ее крупномасштабную структуру.

Предположение, что темная материя достигает теплового равновесия с частицами видимого сектора в ранней Вселенной, позволяет определить характерную область в пространстве параметров моделей темной материи. Действительно, в этом случае можно построить соответствующие кривые реликтовой плотности темной материи, которые отражают зависимость константы взаимодействия медиатора с частицами Стандартной модели от массы медиатора при наблюдаемой в настоящий момент плотности темной материи во Вселенной [11]. Далее, под термином реликтовые кривые (кривые реликтовой плотности или термальная мишень) темной материи мы будем понимать зависимость, описанную выше. Однако, существующие ограничения из прямого поиска [12–14] и из данных Большого адронного коллайдера [15] мотивируют исследования в области легкой термальной темной материи с массами меньше $\mathcal{O}(1)$ ГэВ. Для исследования параметров в таких областях масс, эксперименты с фиксированной мишенью, обладающие высокой интенсивностью пучка частиц, имеют неплохой потенциал [16].

Для того чтобы теоретические расчеты реликтовой плотности темной материи не противоречили наблюдениям [17],

можно ввести новые порталные взаимодействия, где через медиатор темной материи может происходить взаимодействие видимого и темного секторов. В литературе рассматривается механизм получения наблюдаемой плотности темной материи через процесс *вымораживания* (freeze-out) [17]. В этом случае предполагается, что частицы темной материи аннигилируют в частицы Стандартной модели через медиатор. В частности, в качестве медиаторов темной материи используются новые гипотетические массивные частицы такие как: скаляр [18], вектор [19], псевдоскаляр [20] тензорный медиатор [21] и фермион [22]. Кроме того, также рассматриваются модели миллизаряженной [11] и дипольной [23] связи, где в качестве медиатора может выступать фотон Стандартной модели. Также стоит подчеркнуть, что отсутствие подавления по скорости в полном сечении s -волновой аннигиляции легкой темной материи через медиатор приводит к значительным ограничениям из космического микроволнового излучения [24].

Поиск медиаторов в области масс легкой темной материи в характерном интервале $\mathcal{O}(1)$ МэВ до $\mathcal{O}(1)$ ГэВ хорошо мотивирован для экспериментов с фиксированной мишенью из-за комбинирования преимуществ высоких интенсивностей и достаточно большой энергии налетающего на мишень пучка заряженных лептонов ($l = e, \mu$) [25]. Отметим, что для описания рождения медиатора темной материи при торможении высокоэнергетического лептона в поле тяжелого покоящегося ядра удобно использовать приближение Вайцзеккера-Вильямса [26]. Метод Вайцзеккера-Вильямса, с точностью на уровне $\lesssim \mathcal{O}(10)\%$ относительно прямых расчетов на древесном уровне, позволяет описать рождение медиатора в поле ядра в экспериментах с фиксированной мишенью [27]. Электромагнитное взаимодействия налетающих частиц с адрона-

ми можно описать с помощью параметризации вершины через форм-факторы ядер.

Следует также отметить, что при падении высокоэнергетического электрона на мишень, существует дополнительный канал аннигиляции вторичных позитронов электромагнитного ливня на атомных электронах в темную материю, $e^+e^- \rightarrow \text{MED} \rightarrow \text{DM} + \text{DM}$ [28]. Данный канал может приводить к заметному усилению чувствительности экспериментов с фиксированной мишенью в узкой области пространства параметров моделей легкой темной материи.

Отсутствие сигнала рождения темной материи как в тормозном, так и в аннигиляционном канале, позволяет получить ограничения на параметры модели темной материи с медиаторами в существующих экспериментах, либо оценить чувствительность к ее поиску в планируемых установках с фиксированной мишенью.

Актуальность исследования

При исследовании динамики астрофизических объектов возникли противоречия между наблюдениями и теоретическими предсказаниями их поведения в гравитационно-обусловленных явлениях. Это расхождение привело к необходимости разработки сценариев новой физики за рамками Стандартной модели. Разрешение полученного несоответствия возможно с помощью введения скрытой доминирующей материальной компоненты Вселенной – темной материи, идея которой в текущий момент является превалирующей над другими подходами, в частности, модификации ньютоновской теории гравитации. В частности, такое положение дел приводит к тому, что астрофизические свидетельства темной материи дают оценку ее плотности во Вселенной из ее влияния на видимую материю, но данные наблюдения не конкретизируют тип частиц темной материи. Пространство параметров моделей ча-

стиц темной материи достаточно велико, поэтому, как правило, при исследовании моделей темного сектора, приходится работать с фиксированным набором переменных (спин, масса, константа связи или тип медиатора), описывающих взаимодействие темной материи и видимого сектора.

Отсутствие сигнальных событий, подтверждающих обнаружение частиц темной материи на установках по прямому их поиску и в столкновительных экспериментах на Большом адронном коллайдере [15], мотивирует исследование пространства параметров моделей скрытого сектора в других экспериментах. Среди экспериментов по прямому поиску темной материи можно выделить такие установки как DAMA [29], CDMS [30], XENON1T [31], PANDAX-4T [32] и др.

Для исследования пространства параметров моделей легкой термальной темной материи и ее медиаторов для масс $\lesssim \mathcal{O}(1)$ ГэВ эксперименты с фиксированной мишенью могут являться надежным дополнением к установкам по прямому поиску темной материи [15]. Получение ограничений в пространстве параметров легкой термальной темной материи из проводимых в настоящее время (NA64e [33] и NA64 μ [34]) и планируемых экспериментов (LDMX [11] и M³ [35]) с фиксированной мишенью является значимым и актуальным направлением фундаментальной физики, а именно Стандартной модели фундаментальных взаимодействий элементарных частиц и ее расширений, обусловленные проблемой темной материи. Объектом исследования является пространство параметров моделей частиц скрытого сектора, а предметом исследования рождение медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью.

Цели и задачи работы.

Целью данного диссертационного исследования является получение ограничений на пространство параметров моделей

темной материи в предположении отсутствия сигнальных событий рождения медиаторов темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью. Данная цель разбивается на следующие задачи.

1. Получить ограничения на константу взаимодействия лептона и тензорного медиатора при торможении заряженного лептона в поле тяжелых ядер фиксированной мишени для различных моделей форм-факторов [36].
2. Найти 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 [37].
3. Получить зависимость константы взаимодействия скалярного медиатора с электроном от массы медиатора для наблюдаемой в настоящий момент плотности темной материи во Вселенной для дираковской, майоровской, скалярной и векторной термальной темной материи [38]. Оценить чувствительность экспериментов NA64e и LDMX в области параметров моделей соответствующих типов частиц темной материи.

Методика исследования

При выполнении диссертационной работы использовались методы современной теоретической физики, в частности, квантовой теории и космологии для получения сечений соответствующих процессов и для расчета кривых реликтовой плотности темной материи. В данной работе используются гипотеза о существовании легкой термальной темной материи и медиаторов различного спина, которые связывают ее с видимым сектором Стандартной Модели. На основе предположения об отсутствии сигнальных событий наблюдения тем-

ной материи в планируемых и проводимых в настоящее время экспериментах с фиксированной мишенью, получены ограничения на пространство параметров темной материи и оценена перспектива таких экспериментов обнаружить темную материю. Результаты, представленные в работе, получены путем численных вычислений и аналитических расчетов сечений с использованием программы Wolfram Mathematica и ее пакета FeynCalc, соответственно.

Положения, выносимые на защиту

1. Оценена чувствительность проводимых в настоящее время лептонных экспериментов с фиксированной мишенью для поиска моделей с тензорным медиатором скрытого сектора в предположении отсутствия сигнальных событий для данных установок при торможении высокоэнергетического заряженного лептона в поле тяжелого ядра. В частности, показано, что эксперимент NA64e при достижении планируемой статистики в 5×10^{12} электронов, накопленных на мишени, может быть чувствителен к поискам тензорного медиатора с константой взаимодействия в диапазоне $c_{ee}^G \gtrsim 1.4 \times 10^{-4} \text{ GeV}^{-1}$ для масс $200 \text{ МэВ} \lesssim m_G \lesssim 1 \text{ ГэВ}$ на уровне достоверности 90 % С. Л.. Также, эксперимент NA64 μ позволит ограничить константу взаимодействия тензорного медиатора и мюона на уровне достоверности 90 % С. Л. в диапазоне $c_{\mu\mu}^G \gtrsim 1.15 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1}$ для аналогичного интервала масс при планируемой статистике в 5×10^{13} мюонов, накопленных на мишени. В расчетах предполагалось, что тензорный медиатор распадается в основном канале на частицы скрытого сектора.
2. Для экспериментов NA64e и LDMX получены чувствительности в пространстве параметров моделей с тен-

зорным медиатором темной материи на основе процессов резонансной аннигиляции вторичных позитронов электромагнитного ливня на атомарных электронах мишени для различных типов легкой темной материи. Соответствующее резонансное усиление чувствительности для NA64e и LDMX происходит в диапазоне масс $0.23 \text{ ГэВ} \lesssim m_{\text{MED}} \lesssim 0.32 \text{ ГэВ}$ и $0.11 \text{ ГэВ} \lesssim m_{\text{MED}} \lesssim 0.13 \text{ ГэВ}$, соответственно. Для константы взаимодействия тензорного медиатора с темной материей было выбрано значение $c_{\text{DM DM}}^G \simeq 1 \text{ ГэВ}^{-1}$.

3. Изучено влияние выбора существующих моделей параметризации упругих атомных форм-факторов на величину сечения рождения тензорного медиатора в поле ядра в приближении Вайцзеккера-Вильямса для диапазона масс $1 \text{ МэВ} \lesssim m_{\text{MED}} \lesssim 1 \text{ ГэВ}$. В частности, для проводимых в настоящее время экспериментов NA64e и NA64 μ с энергиями налетающей частицы порядка 100 ГэВ относительная разница в сечениях для рассматриваемых моделей упругих атомных форм-факторов не превышает значения в 5 %, аналогично, в случае планируемых экспериментов LDMX и M³ с энергиями налетающей частицы порядка 10 ГэВ, для относительной разницы справедлива оценка $\lesssim 30 \text{ %}$.
4. Показано, что для скалярного медиатора, взаимодействующего преимущественно с электроном, и текущей статистики в 9.37×10^{11} электронов, накопленных на мишени, эксперимент NA64e позволяет исключить на уровне достоверности 90 % С. Л. дираковскую легкую темную материю для масс медиатора $m_\phi \lesssim 300 \text{ МэВ}$. В частности, при расчете использовалось фиксированное значение аналога постоянной тонкой структуры

для взаимодействия скалярного медиатора и дираковской темной материи в виде $\alpha_\psi = (c_{\psi\psi}^\phi)^2/(4\pi) = 0.5$, соотношение масс выбрано как $m_\psi/m_\phi = 1/3$. В расчетах предполагалось, что скалярный медиатор распадается в основном канале на частицы дираковской темной материи.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в оценке текущих ограничений для скалярного и тензорного медиаторов на основе предположения об отсутствии сигнальных событий рождения соответствующего медиатора в экспериментах с фиксированной мишенью.

1. Впервые получены ограничения на константу взаимодействия тензорного медиатора и заряженного лептона в экспериментах NA64e, NA64 μ , LDMX и M³, в предположении отсутствия сигнала от процессов рождения медиатора при рассеянии лептонов на ядрах мишени. При расчетах предполагалось, что медиатор распадается в основном канале на частицы скрытого сектора.
2. Впервые получены ограничения на константу взаимодействия электрона и тензорного медиатора в экспериментах NA64e и LDMX для процесса аннигиляции вторичных позитронов на атомных электронах мишени в случае дираковской и скалярной темной материи.
3. Впервые изучено влияние различных моделей параметризации упругих атомных форм-факторов на сечение рождения медиатора скрытого сектора при рассеянии заряженного лептона в поле ядра, посчитанное в приближении Вайцзеккера-Вильямса.
4. Впервые рассчитаны ограничения на константу взаимодействия скалярного медиатора и электрона из

экспериментов NA64e, LDMX в предположении отсутствия сигнала рождения такого медиатора при рассеянии заряженного лептона на ядрах мишени. При расчетах предполагалось, что медиатор распадается в основном канале на частицы темной материи.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные результаты имеют важное теоретическое значение для нахождения феноменологически приемлемых сценариев новой физики за пределами Стандартной модели фундаментальных взаимодействий, предлагающих решение проблемы темной материи. Действительно, на текущий момент темная материя является превалирующей теорией для понимания эволюции Вселенной и объяснения ряда существенных противоречий между наблюдениями и предсказаниями. Получение ограничений на пространство параметров темной материи позволяет приблизиться к пониманию ее природы, путем постепенного исключения кандидатов на роль скрытой материи. В частности, полученные оценки ограничений могут быть использованы в планируемых и проводимых в настоящее время экспериментах с фиксированной мишенью, что позволит исследовать значительное пространство параметров легкой темной материи.

Степень достоверности. Основные статьи по теме диссертации были опубликованы в признанных международных изданиях, пройдя процедуру рецензирования. Достоверность результатов диссертационного исследования обуславливается использованием в нем апробированных в научной практике методов теоретической физики, а также их сравнением с уже известными результатами.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на:

1. XXI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», ТПУ, 24.04.24, г. Томск с темой "Излучение тензорного медиатора темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью".
2. Научных семинарах с темой диссертационного исследования:
 - 08.05.24 в Томском Политехническом Университете
 - 27.05.24 в Институте Ядерных Исследований РАН
 - 26.09.24 в Петербургском Институте Ядерной Физики НИЦ "Курчатовский Институт"
3. Международном совещании от 13.12.22 коллаборации NA64 по теме "Probing spin-2 DM mediator with NA64e via resonant production $e^+e^- \rightarrow G \rightarrow \chi\chi$ ".

Личный вклад автора. Постановка задач и методов реализации осуществлялась автором диссертации совместно с научным руководителем. Все расчеты в диссертационном исследовании выполнены непосредственно соискателем.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 135 страниц с 12 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 225 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ. Обсуждается актуальность исследования процессов рождения медиаторов темной материи в контексте экспериментов с фиксированной мишенью. Данные процессы могут быть использованы для получения оценки ограничений на пространство параметров моделей частиц скрытого сектора. На основе полученных результатов работы перечисляются положения, которые выносятся на защиту, и указываются их новизна и теоретическая значимость.

ГЛАВА 1. Приведены основные астрофизические свидетельства темной материи и используемые модели медиаторов скрытого сектора. Далее кратко перечислим основные результаты рассматриваемой главы.

Раздел 1.1. Рассмотрены основные экспериментальные наблюдения, которые мотивируют введение скрытой массы.

Раздел 1.2. Приведена методика расчета реликтовой плотности темной материи, что позволяет, в комбинации с экспериментами, ограничивать пространство параметров моделей легкой темной материи и ее медиаторов. А именно, приведены выражения для расчета реликтовых кривых в случае интегральной формулы Гелмини [39] и формулы термально усредненного сечения в нерелятивистском приближении [40].

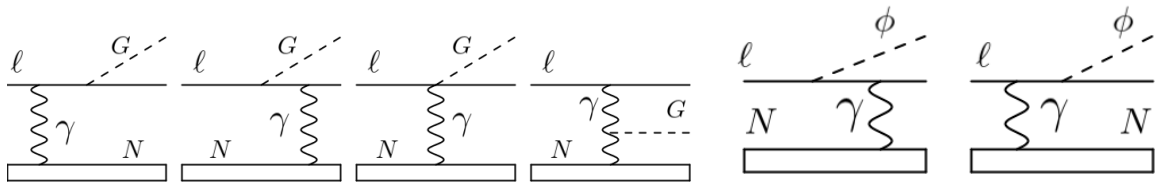


Рисунок 1 — Диаграммы процессов излучения скалярного ϕ и тензорного G медиаторов в поле ядра N при падении на ядро лептона ℓ .

Раздел 1.3. Приведены эффективные лагранжианы взаимодействия для скалярного и тензорного медиаторов темной материи в случае их взаимодействия с заряженными лептонами видимого сектора и с различными типами темной мате-

рии. А именно, в случае взаимодействующего преимущественно с электроном скалярного медиатора использованы вещественный скалярный, дираковский, майорановский и векторный типы темной материи. Аналогично, для тензорного медиатора рассмотрены дираковский, скалярный и векторный тип частиц темной материи.

ГЛАВА 2. Обсуждается процесс рождения медиатора в поле ядер мишени при торможении лептонного пучка. Рассматривается резонансная реакция аннигиляции вторичных позитронов электромагнитного ливня с атомарными электронами в частицы темной материи. Далее кратко опишем основные результаты рассматриваемой главы.

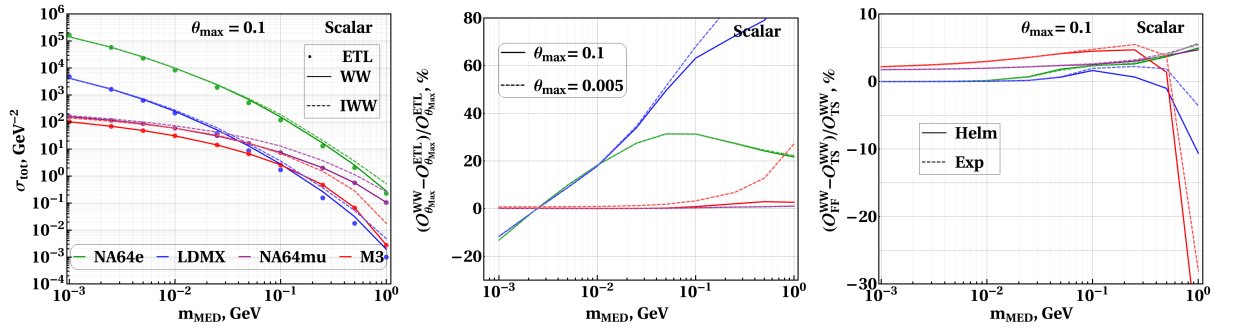


Рисунок 2 — *Общее*. Полное сечение и его относительная разница для различных углов вылета медиатора и различных моделей атомных форм-факторов. Чувствительности экспериментов обозначены цветными линиями, а именно NA64e (зеленый) LDMX (синий) NA64 μ (фиолетовый) и M³ (красный). *Первый столбец*. Полное сечение излучения скалярного медиатора в поле ядер мишени в зависимости от массы с использованием приближения Вайцзеккера-Вильямса (непрерывная линия), приближения улучшенного Вайцзеккера-Вильямса (пунктирная линия) и расчетов на древесном уровне (точки). Константа взаимодействия для скаляра и лептона принимает равна $c_{ll}^{\phi} = 1$. *Второй столбец*. Относительная разница полных сечений в подходе Вайцзеккера-Вильямса и расчетов на древесном уровне в случае различных максимальных углов вылета $\theta_{\max} = 0.1$ и $\theta_{\max} = 0.005$. *Третий столбец*. Относительная разница полных сечений сечений для хельмовского (непрерывная линия) и экспоненциального (пунктирная линия) форм-факторов, где за эталонный взят форм-фактор Тсаи-Шиффа.

Раздел 2.1. Приведены формулы для расчета дифференциального сечения рождения скалярного и тензорного медиаторов скрытого сектора в поле тяжелого ядра мишени в приближении Вайцзеккера-Вильямса и для расчетов на древесном уровне. Соответствующие диаграммы для процесса рождения скалярного и тензорного медиаторов скрытого сектора показаны на рисунке 1. Получены характерные массы медиатора, для которых начинается значительное зарезание сечения экспоненциально убывающими форм-факторами или заметно проявляется эффект экранирования ядра атомными электронами.

Раздел 2.2. Рассчитаны полные сечения для процессов аннигиляции вторичных позитронов на атомных электронах мишени. Также, получены полные сечения аннигиляции темной материи в видимый сектор через медиатор.

ГЛАВА 3. В данном разделе приводятся оценки ограничений на пространство параметров моделей частиц скрытого сектора на основе процессов рождения медиатора в лептонных экспериментах с фиксированной мишенью. Далее кратко рассмотрим основное содержание текущей главы.

Раздел 3.1. Приводятся параметры планируемых и текущих лептонных экспериментов с фиксированной мишенью, которые позволяют установить ограничения на константу взаимодействия медиатора с лептоном.

Для скалярного и тензорного медиаторов приведено сравнение метода Вайцзеккера-Вильямса с расчетами на древесном уровне для процесса рождения медиатора в поле ядер мишени для полного и дифференциального сечения. Также, в случае скалярного медиатора обсуждается влияние выбора максимального угла вылета медиатора на полное сечение.

Раздел 3.2. Рассматривается влияние выбора моделей форм-факторов на дифференциальное и полное сечения рождения медиатора в поле тяжелых ядер в приближении Вайц-

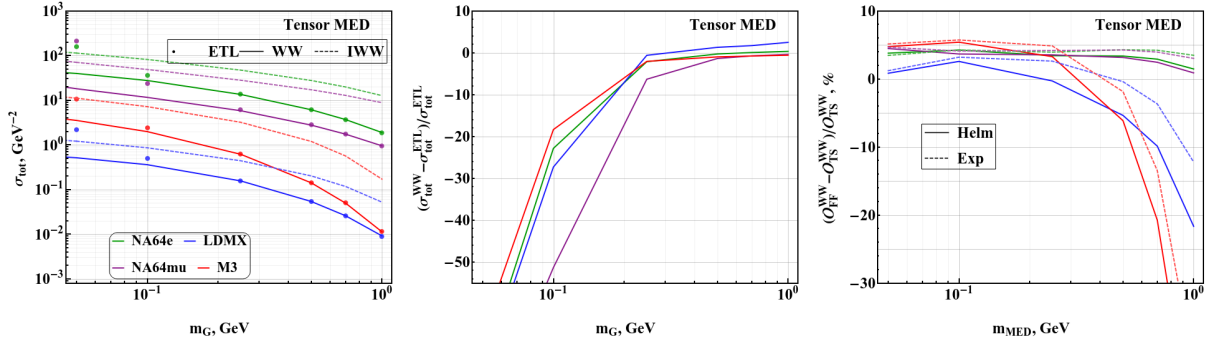


Рисунок 3 — Описание графика аналогично рисунку 2, где соответствующая константа взаимодействия для тензорного медиатора выбрана в виде $c_{ll}^G = 1 \text{ ГэВ}^{-1}$.

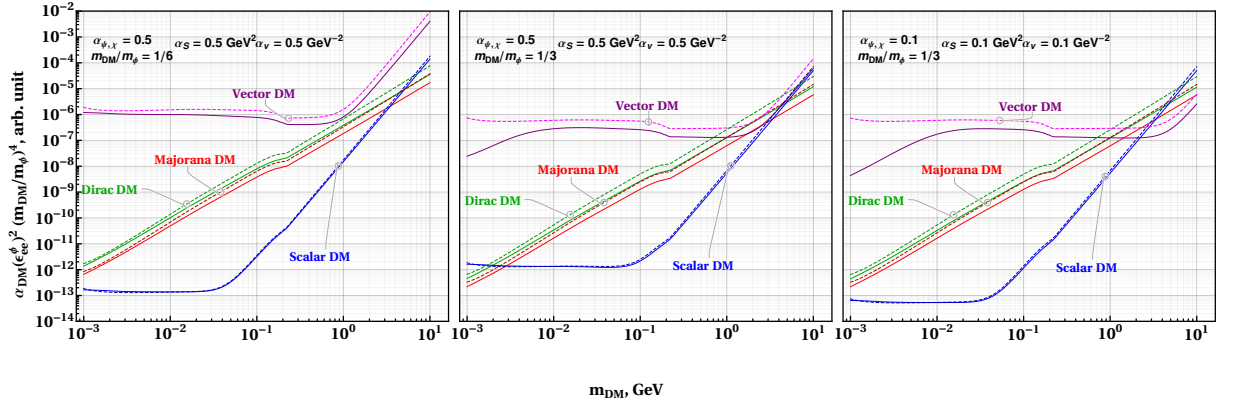


Рисунок 4 — Кривые реликтовой плотности темной материи. Майорановская [11], дираковская, скалярная и векторная темная материя изображены красной, зеленой, синей и фиолетовой линиями, соответственно. Сплошные линии соответствуют численному расчету через интегральную формулу Гельмини, а пунктирные линии представляют расчет реликтовой плотности в нерелятивистском приближении. Далее, приводятся численные значения параметров α_{DM} с соответствующей размерностью для скаляра, фермиона и вектора как ГэВ^2 , 1 и ГэВ^{-2} , соответственно. Левая панель: $\alpha_{DM} = 0.5$, $m_{DM}/m_\phi = 1/6$. Центральная панель: $\alpha_{DM} = 0.5$, $m_{DM}/m_\phi = 1/3$. Правая панель: $\alpha_{DM} = 0.1$, $m_{DM}/m_\phi = 1/3$.

зеккера-Вильямса. В частности, обсуждается влияние моделей форм-факторов на дифференциальное сечение по доле унесенной энергии для рассматриваемых экспериментов и медиаторов. Аналогично, рассматривается влияние моделей форм-факторов на полное сечение, что можно видеть для

скалярного и тензорного медиаторов на рисунках 2 и 3, соответственно.

Раздел 3.3. Обсуждаются реликтовые кривые для легкой темной материи в предположении ее термального контакта в ранней Вселенной и электронспецифичного скалярного медиатора темной материи, которые изображены на рисунке 4.

Раздел 3.4. Получены ограничения на константу взаимодействия скалярного и тензорного медиаторов скрытого сектора с лептоном для невидимой моды рассматриваемых экспериментов. Аналогично, оценена чувствительность к параметрам моделей темной материи на основе отсутствия сигнальных событий при аннигиляции вторичных позитронов на атомарных электронах. На рисунках 5 и 6 приводятся полученные ограничения на константу взаимодействия скалярного и тензорного медиаторов, соответственно.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Приведен явный вид матричных элементов и сечений для рассматриваемых процессов

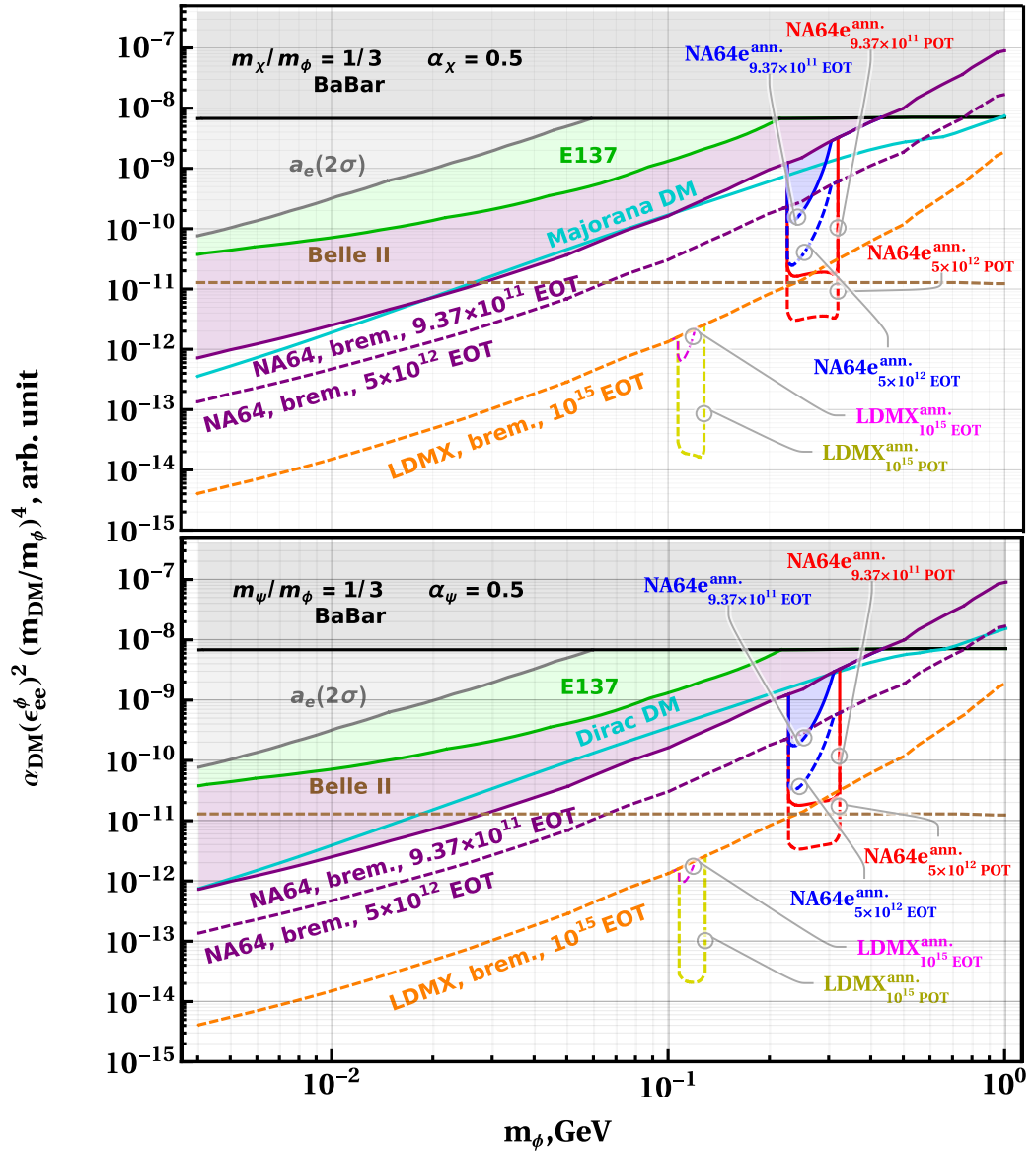


Рисунок 5 — Ограничения на константу взаимодействия скалярного медиатора с электроном на основе отсутствия сигнальных событий в невидимой моде экспериментов с фиксированной мишенью. Для текущей статистики экспериментов используется непрерывная линия, а планируемой — пунктирная. Черной, зеленой и коричневой линиями показаны существующие пределы на основе экспериментов BaBar [41], E137 [11; 42; 43] и Belle II [11], соответственно. Фиолетовой (оранжевой) линией показано ограничения из эксперимента NA64e (LDMX) на основе процесса рождения медиатора в поле ядер мишени. Красной и синей (желтой и розовой) линиями показаны ограничение из резонансной реакции для позитронной и электронной мод из эксперимента NA64e (LDMX), соответственно. Верхняя и нижняя панели соответствуют майорановской и дираковской типам темной материи, где кривые реликтовые плотности изображены бирюзовой линией.

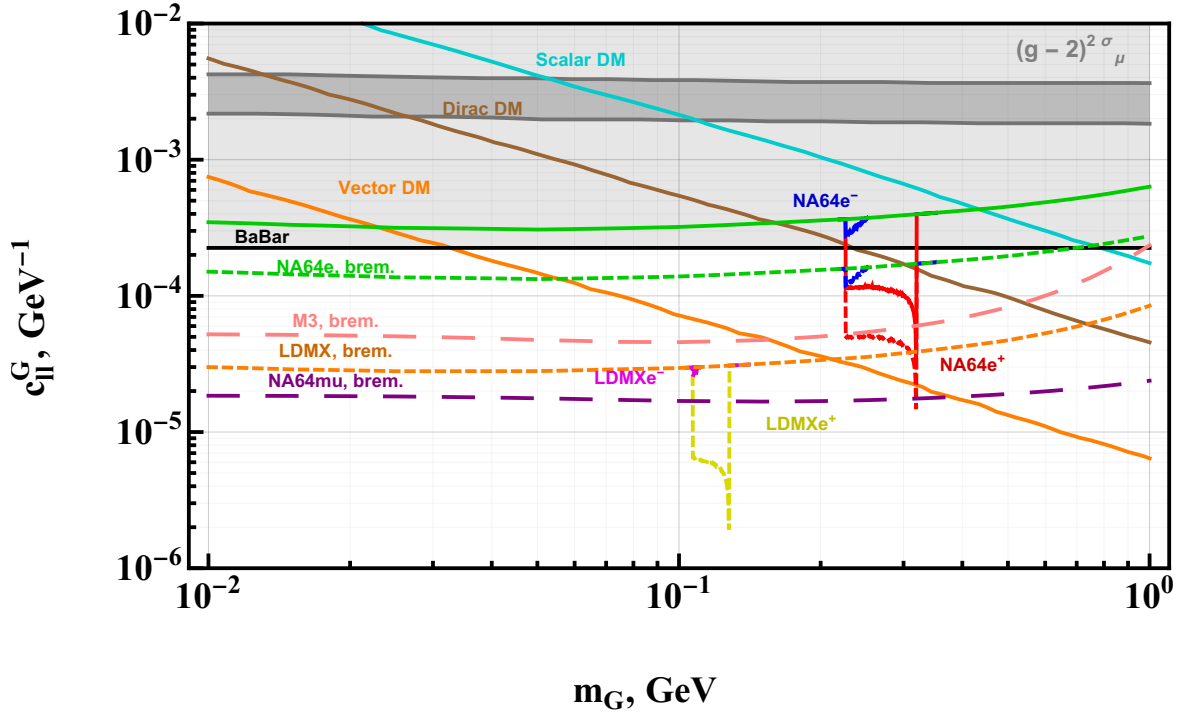


Рисунок 6 — Ограничения на константу взаимодействия тензорного медиатора с лептоном на основе отсутствия сигнальных событий в невидимой моде экспериментов с фиксированной мишенью. Для расчета ограничений из резонансного процесса использовались приближение узкого резонанса и следующие параметры $c_{\text{DM DM}}^G \simeq 1 \text{ ГэВ}^{-1}$ и $m_G \approx 2m_{\text{DM}}$. Для текущей статистики экспериментов используется непрерывная линия, а планируемой – пунктирная. Черной линией показаны существующие ограничения на основе эксперимента BaBar [44]. Ограничения из экспериментов NA64e, NA64 μ , LDMX и M³ на основе процесса рождения медиатора в поле ядер мишени изображены зеленой, фиолетовой, оранжевой и розовой линиями, соответственно. Ограничение из резонансной реакции для электронной и позитронной мод эксперимента NA64e (LDMX) показаны синей (малиновой) и красной (желтой) линиями, соответственно. Реликтовые кривые для скалярной, дираковской и векторной темной материи изображены бирюзовой, коричневой и оранжевой линиями, соответственно [44]. Для приведенных термальных кривых на графике из работы [44] были использованы $c_{\text{DM DM}}^G \simeq 1 \text{ ГэВ}^{-1}$ и $m_G \gtrsim 2m_{\text{DM}}$. Область $(g - 2)_\mu$ при 2σ показана серой полосой [44].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе получены ограничения и оценена чувствительность лептонных экспериментов с фиксированной мишенью для поиска моделей медиаторов скрытого сектора со спином 0 и спином 2. Для вычисления числа сигнальных событий рождения медиаторов использовались два основных канала при рассеянии заряженного лептона на мишени. Первый канал предполагает тормозное рождение медиатора в приближении Вайцзеккера-Вильямса. Второй канал связан с процессом аннигиляции вторичных позитронов электромагнитного ливня с атомарными электронами, которые рождают медиатор, распадающийся на частицы темной материи. Перечислим основные полученные результаты в диссертации.

1. Оценена чувствительность планируемых (LDMX и M^3) и получены ограничения проводимых в настоящее время (NA64e и NA64 μ) лептонных экспериментов 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. Для получения ограничений на уровне достоверности 90 % С. Л. использовалось приближение Вайцзеккера-Вильямса для интервала масс $200 \text{ МэВ} \lesssim m_G \lesssim 1 \text{ ГэВ}$. Эксперимент NA64e при текущей статистике 9.37×10^{11} электронов, накопленных на мишени, дает ограничения на уровне $c_{ee}^G \gtrsim 3.3 \times 10^{-4} \text{ GeV}^{-1}$, однако полученные ограничения эксперимента NA64e не достигают существующих пределов из эксперимента BaBar на уровне $c_{ee}^G \gtrsim 2.2 \times 10^{-4} \text{ GeV}^{-1}$. В случае планируемой статистики в 5×10^{12} электронов, накопленных на мишени, эксперимент NA64e позволит улучшить ограничения на пространство параметров моделей темного сектора в диапазоне $c_{ee}^G \gtrsim 1.4 \times 10^{-4} \text{ GeV}^{-1}$. Планируемая статистика эксперимента LDMX как 10^{15} электронов, накопленных на мише-

ни, может дать улучшенную чувствительность по сравнению с экспериментом NA64e на уровне $c_{ee}^G \gtrsim 3 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1}$. 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, M³ при планируемой статистике 10^{13} мюонов, накопленных на мишени, 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 была взята в виде $c_{\text{DM DM}}^G \simeq 1 \text{ ГэВ}^{-1}$. 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 вносит новых ограничений по сравнению с экспериментом 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 показывает 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 M³) 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 $m_{\text{MED}} \lesssim 400$ МэВ в случае хельмовского и экспоненциального форм-факторов по отношению к форм-фактору Тсаи-Шиффа относительная разница для полных сечений составляет $\lesssim 5\%$ для рассматриваемых экспериментов с фиксированной мишенью. Далее, для масс $400 \text{ МэВ} \lesssim m_{\text{MED}} \lesssim 1$ ГэВ соответствующая относительная разница полных сечений для экспериментов NA64e и NA64 μ принимает вид $\lesssim 5\%$ и, аналогично, для экспериментов LDMX и M³ справедлива оценка $\lesssim 30\%$.

4. Показано, что эксперимент NA64e для скалярного медиатора, взаимодействующего преимущественно с электроном, при текущей статистике в 9.37×10^{11} электронов, накопленных на мишени, позволяет исключить дираковскую легкую темную материю для масс $m_\phi \lesssim 300$ МэВ на уровне достоверности 90 %. С. Л. Также, эксперимент NA64e с планируемой статистикой в 5×10^{12} электронов, может исключить майорановскую темную материю. Аналогично, при наборе планируемой статистики эксперимент LDMX позволит подтвердить полученные из эксперимента NA64e ограничения на взаимодействие скалярного медиатора и электрона в случае дираковской и майорановской темной материи.

Основные публикации по теме диссертации

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. — Т. 106, № 11. — С. 115041. — DOI: 10.1103/PhysRevD.106.115041. — arXiv: 2210.00751 [hep-ph].
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. — Т. 107, № 11. — С. 115034. — DOI: 10.1103/PhysRevD.107.115034. — arXiv: 2304.14052 [hep-ph].
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. — Т. 109, № 7. — С. 075012. — DOI: 10.1103/PhysRevD.109.075012. — arXiv: 2312.15697 [hep-ph].

Список литературы

1. *Zwicky F.* Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln // *Helv. Phys. Acta.* — 1933. — Т. 6. — С. 110—127. — DOI: 10.1007/s10714-008-0707-4.
2. *Rubin V. C., Thonnard N., Ford Jr. W. K.* Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 / $R = 4\text{kpc}$ / to UGC 2885 / $R = 122\text{ kpc}$ / // *Astrophys. J.* — 1980. — Т. 238. — С. 471. — DOI: 10.1086/158003.
3. *Markevitch M.* Chandra observation of the most interesting cluster in the universe // *ESA Spec. Publ.* — 2006. — Т. 604. — С. 723. — arXiv: astro-ph/0511345.
4. *White S. D. M., Frenk C. S., Davis M.* Clustering in a Neutrino Dominated Universe // *Astrophys. J. Lett.* / под ред. М. А. Srednicki. — 1983. — Т. 274. — С. L1—L5. — DOI: 10.1086/161425.
5. *Hu W., Dodelson S.* Cosmic Microwave Background Anisotropies // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2002. — Т. 40. — С. 171—216. — DOI: 10.1146/annurev.astro.40.060401.093926. — arXiv: astro-ph/0110414.
6. Is the observable Universe consistent with the cosmological principle? / P. K. Aluri [и др.] // *Class. Quant. Grav.* — 2023. — Т. 40, № 9. — С. 094001. — DOI: 10.1088/1361-6382/acbefc. — arXiv: 2207.05765 [astro-ph.CO].
7. *Hubble E.* A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae // *Proc. Nat. Acad. Sci.* — 1929. — Т. 15. — С. 168—173. — DOI: 10.1073/pnas.15.3.168.
8. *Perivolaropoulos L., Skara F.* Challenges for ΛCDM : An update // *New Astron. Rev.* — 2022. — Т. 95. — С. 101659. — DOI: 10.1016/j.newar.2022.101659. — arXiv: 2105.05208 [astro-ph.CO].
9. *Peebles P. J. E., Ratra B.* The Cosmological Constant and Dark Energy // *Rev. Mod. Phys.* / под ред. J.-P. Hsu, D. Fine. — 2003. — Т. 75. — С. 559—606. — DOI: 10.1103/RevModPhys.75.559. — arXiv: astro-ph/0207347.
10. *Baumann D.* Inflation // *Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics: Physics of the Large and the Small.* — 2011. — С. 523—686. — DOI: 10.1142/9789814327183_0010. — arXiv: 0907.5424 [hep-th].
11. Dark Matter, Millicharges, Axion and Scalar Particles, Gauge Bosons, and Other New Physics with LDMX / A. Berlin [и др.] // *Phys. Rev. D.* — 2019. — Т. 99, № 7. — С. 075001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.99.075001. — arXiv: 1807.01730 [hep-ph].

12. Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure / D. S. Akerib [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Т. 118, № 2. — C. 021303. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.021303. — arXiv: 1608.07648 [astro-ph.CO].
13. Dark Matter Results From 54-Ton-Day Exposure of PandaX-II Experiment / X. Cui [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Т. 119, № 18. — C. 181302. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.181302. — arXiv: 1708.06917 [astro-ph.CO].
14. First Dark Matter Search Results from the XENON1T Experiment / E. Aprile [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Т. 119, № 18. — C. 181301. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.181301. — arXiv: 1705.06655 [astro-ph.CO].
15. *Cirelli M., Strumia A., Zupan J.* Dark Matter. — 2024. — Июнь. — arXiv: 2406.01705 [hep-ph].
16. Feebly-interacting particles: FIPs 2020 workshop report / P. Agrawal [и др.] // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Т. 81, № 11. — C. 1015. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09703-7. — arXiv: 2102.12143 [hep-ph].
17. *Krnjaic G.* Probing Light Thermal Dark-Matter With a Higgs Portal Mediator // Phys. Rev. D. — 2016. — Т. 94, № 7. — C. 073009. — DOI: 10.1103/PhysRevD.94.073009. — arXiv: 1512.04119 [hep-ph].
18. *McDonald J.* Gauge singlet scalars as cold dark matter // Phys. Rev. D. — 1994. — Т. 50. — C. 3637—3649. — DOI: 10.1103/PhysRevD.50.3637. — arXiv: hep-ph/0702143.
19. *Holdom B.* Two U(1)'s and Epsilon Charge Shifts // Phys. Lett. B. — 1986. — Т. 166. — C. 196—198. — DOI: 10.1016/0370-2693(86)91377-8.
20. *Nomura Y., Thaler J.* Dark Matter through the Axion Portal // Phys. Rev. D. — 2009. — Т. 79. — C. 075008. — DOI: 10.1103/PhysRevD.79.075008. — arXiv: 0810.5397 [hep-ph].
21. *Lee H. M., Park M., Sanz V.* Gravity-mediated (or Composite) Dark Matter // Eur. Phys. J. C. — 2014. — Т. 74. — C. 2715. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-2715-8. — arXiv: 1306.4107 [hep-ph].
22. Lepton flavor portal matter / G. N. Wojcik [и др.] // Phys. Rev. D. — 2023. — Т. 108, № 5. — C. 055033. — DOI: 10.1103/PhysRevD.108.055033. — arXiv: 2303.12983 [hep-ph].
23. *Chang S., Weiner N., Yavin I.* Magnetic Inelastic Dark Matter // Phys. Rev. D. — 2010. — Т. 82. — C. 125011. — DOI: 10.1103/PhysRevD.82.125011. — arXiv: 1007.4200 [hep-ph].

24. Systematic Uncertainties In Constraining Dark Matter Annihilation From The Cosmic Microwave Background / S. Galli [и др.] // Phys. Rev. D. — 2013. — Т. 88. — С. 063502. — DOI: 10.1103/PhysRevD.88.063502. — arXiv: 1306.0563 [astro-ph.CO].
25. Gninenko S. N., Krasnikov N. V., Matveev V. A. Search for light dark matter in the NA64 experiment // Usp. Fiz. Nauk. — 2021. — Т. 191, № 12. — С. 1361–1386. — DOI: 10.3367/UFNe.2021.09.039066.
26. Kim K. J., Tsai Y.-S. Improved Weizsacker-Williams Method and Its Application to Lepton and W-Boson Pair Production // Phys. Rev. D. — 1973. — Т. 8. — С. 3109. — DOI: 10.1103/PhysRevD.8.3109. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.8.3109>.
27. New fixed-target experiments to search for dark gauge forces / J. D. Bjorken [и др.] // Phys. Rev. D. — 2009. — Окт. — Т. 80, вып. 7. — С. 075018. — DOI: 10.1103/PhysRevD.80.075018. — arXiv: 0906.0580.
28. Dark photon production through positron annihilation in beam-dump experiments / L. Marsicano [и др.] // Phys. Rev. D. — 2018. — Т. 98, № 1. — С. 015031. — DOI: 10.1103/PhysRevD.98.015031. — arXiv: 1802.03794 [hep-ex].
29. New results from DAMA/LIBRA / R. Bernabei [и др.] // Eur. Phys. J. C. — 2010. — Т. 67. — С. 39–49. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-010-1303-9. — arXiv: 1002.1028 [astro-ph.GA].
30. Nuclear-Recoil Energy Scale in CDMS II Silicon Dark-Matter Detectors / R. Agnese [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2018. — Т. 905. — С. 71–81. — DOI: 10.1016/j.nima.2018.07.028. — arXiv: 1803.02903 [physics.ins-det].
31. Conceptual design and simulation of a water Cherenkov muon veto for the XENON1T experiment / E. Aprile [и др.] // JINST. — 2014. — Т. 9. — P11006. — DOI: 10.1088/1748-0221/9/11/P11006. — arXiv: 1406.2374 [astro-ph.IM].
32. Dark Matter Search Results from the PandaX-4T Commissioning Run / Y. Meng [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Т. 127, № 26. — С. 261802. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.261802. — arXiv: 2107.13438 [hep-ex].
33. Improved exclusion limit for light dark matter from e+e- annihilation in NA64 / Y. M. Andreev [и др.] // Phys. Rev. D. — 2021. — Т. 104, № 9. — С. L091701. — DOI: 10.1103/PhysRevD.104.L091701. — arXiv: 2108.04195 [hep-ex].

34. First Results in the Search for Dark Sectors at NA64 with the CERN SPS High Energy Muon Beam / Y. M. Andreev [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2024. — T. 132, № 21. — C. 211803. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.211803. — arXiv: 2401.01708 [hep-ex].
35. M^3 : a new muon missing momentum experiment to probe $(g - 2)_\mu$ and dark matter at Fermilab / Y. Kahn [и др.] // JHEP. — 2018. — T. 09. — C. 153. — DOI: 10.1007/JHEP09(2018)153. — arXiv: 1804.03144 [hep-ph].
36. *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. — T. 106, № 11. — C. 115041. — DOI: 10.1103/PhysRevD.106.115041. — arXiv: 2210.00751 [hep-ph].
37. *Voronchikhin I. V., Kirpichnikov D. V.* Resonant probing spin-0 and spin-2 dark matter mediators with fixed target experiments // Phys. Rev. D. — 2023. — T. 107, № 11. — C. 115034. — DOI: 10.1103/PhysRevD.107.115034. — arXiv: 2304.14052 [hep-ph].
38. *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. — T. 109, № 7. — C. 075012. — DOI: 10.1103/PhysRevD.109.075012. — arXiv: 2312.15697 [hep-ph].
39. *Gondolo P., Gelmini G.* Cosmic abundances of stable particles: Improved analysis // Nucl. Phys. B. — 1991. — T. 360. — C. 145–179. — DOI: 10.1016/0550-3213(91)90438-4.
40. *Wells J. D.* Annihilation cross-sections for relic densities in the low velocity limit. — 1994. — Март. — arXiv: hep-ph/9404219.
41. Search for Invisible Decays of a Dark Photon Produced in e^+e^- Collisions at BaBar / J. P. Lees [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2017. — T. 119, № 13. — C. 131804. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.131804. — arXiv: 1702.03327 [hep-ex].
42. Search for Neutral Metastable Penetrating Particles Produced in the SLAC Beam Dump / J. D. Bjorken [и др.] // Phys. Rev. D. — 1988. — T. 38. — C. 3375. — DOI: 10.1103/PhysRevD.38.3375.
43. *Batell B., Essig R., Surujon Z.* Strong Constraints on Sub-GeV Dark Sectors from SLAC Beam Dump E137 // Phys. Rev. Lett. — 2014. — T. 113, № 17. — C. 171802. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.171802. — arXiv: 1406.2698 [hep-ph].
44. *Kang Y.-J., Lee H. M.* Lightning gravity-mediated dark matter // The European Physical Journal C. — 2020. — Июль. — T. 80, № 7. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-8153-x. — arXiv: 2001.04868.

Ворончихин Илья Вячеславович
Рождение медиаторов темной материи
в экспериментах с фиксированной мишенью

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 13.02.2025

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,1 Зак. № 020/25 Тираж 80 экз. Бесплатно.
Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
Издательский отдел. 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а