

На правах рукописи

КУЗНЕЦОВ

Михаил Юрьевич

**Поиск тяжелой темной материи
методами астрофизики
частиц высоких энергий**

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Рубцов Григорий Игоревич, д. ф.-м. н. (ИЯИ РАН), заместитель директора по научной работе.

Официальные оппоненты:

Рябов Владимир Алексеевич, д. ф.-м. н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук (ФИАН), лаборатория элементарных частиц, главный научный сотрудник.

Шаракин Сергей Александрович, к. ф.-м. н., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ), отдел космических наук, научный сотрудник.

Ведущая организация:

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

Защита состоится в _____ часов _____ на заседании диссертационного совета Д002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), расположенном по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИЯИ РАН по адресу:

<http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01,
доктор физ.-мат. наук,
член-корреспондент РАН

С.В. Троицкий

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Проблема темной материи является одним из немногих экспериментально установленных фактов, однозначно указывающих на фундаментальную неполноту современной физики. Особенно удивительным является то обстоятельство, что за 80 с лишним лет, прошедших со времени первых указаний на существование этой проблемы, несмотря на существенный прогресс физической теории и эксперимента, не было получено каких бы то ни было явных указаний на то, в каком направлении должно лежать ее решение. В настоящее время, исследования темной материи являются отдельной областью науки, лежащей на стыке физики частиц астрофизики и космологии. Оценить степень интенсивности исследований в этой области можно, например, из того факта, что по данным системы SAO/NASA за 2016 год, каждый день выходит в среднем 3 новых исследования посвященных темной материи, а в интернет базе препринтов arXiv.org содержится, в настоящее время, более 14000 таких статей.

Одним из направлений поиска темной материи является поиск ее вторичных сигналов методами астрофизики частиц — так называемый непрямой поиск. В связи с открытием потока космических нейтрино с энергиями до ПэВ на установке IceCube [4, 5] особую актуальность приобрело исследование темной материи с массой частиц более 100 ТэВ (тяжелой темной материи), распад которой мог бы быть источником этих нейтрино. Также интерес к этой теме подкрепляется планируемым вводом в строй целого ряда новых экспериментальных установок по детектированию космических частиц сверхвысоких и ультравысоких энергий: Ковёр, Тайга, LHAASO, KM3NeT, низкоэнергетического расширения установки

Telescope Array — TALE, расширения байкальской нейтринной обсерватории — GVD, а также усовершенствованием основных мощностей экспериментов Telescope Array и Pierre Auger. Исследования на этих установках позволят изучить ранее недоступные области параметров темной материи. В связи с этим, представляется актуальным установить ограничения на эти параметры используя максимум доступных экспериментальных данных, а также выяснить, насколько сильным будет потенциал новых экспериментов в непрямом поиске тяжелой темной материи.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью настоящей работы является поиск сигнала распада темной материи путем совместного анализа результатов нейтринных и ШАЛ экспериментов. Отдельными задачами решаемыми в рамках этого проекта являются.

1. Сопоставление потока фотонов с энергиями выше 100 ТэВ, предсказываемого моделями тяжелой темной материи с экспериментальными верхними пределами на диффузный поток фотонов этих энергий, полученными ШАЛ экспериментами, с целью установления ограничений на время жизни темной материи.
2. Сопоставление потока нейтрино с энергиями выше 100 ТэВ, предсказываемого моделями тяжелой темной материи с данными о зарегистрированном в эксперименте IceCube потоке нейтрино этих энергий. Выяснение возможности объяснения нейтринного сигнала IceCube распадом темной материи, путем сопоставления необходимых для этого параметров темной материи с фотонными ограничениями на эти параметры.
3. Сопоставление анизотропии космических лучей с энергиями выше

100 ТэВ, предсказываемой моделями тяжелой темной материи с данными об анизотропии, полученными ШАЛ экспериментами. Выяснение возможности объяснения наблюдаемой анизотропии распадом темной материи, путем сопоставления необходимых для этого параметров темной материи с фотонными и нейтринными ограничениями на эти параметры.

4. Выяснение относительной эффективности фотонных, нейтринных и анизотропных наблюдаемых в дальнейшем поиске и исследовании возможного сигнала распада тяжелой темной материи в действующих и планируемых экспериментах.

Научная новизна и практическая значимость. В данной диссертации представлен ряд новых результатов.

1. С помощью экспериментальных верхних пределов на поток фотонов с энергиями более 100 ТэВ получены наиболее сильные на сегодняшний день консервативные ограничения на время жизни тяжелой темной материи распадающейся в адроны.
2. Данные ограничения, а также ограничения на ту же модель темной материи из экспериментальных данных о потоке нейтрино и анизотропии космических лучей при энергиях выше 100 ТэВ получены для наиболее широкого диапазона масс темной материи: $10^7 \leq M_X \leq 10^{16}$ ГэВ.
3. На основе наиболее актуальных на сегодня данных IceCube о потоке космических нейтрино самых высоких энергий проанализирована возможность интерпретации этого потока в качестве продукта адронного распада темной материи.

Впервые выполнена оценка относительной эффективности фотонных, нейтринных и анизотропийных наблюдаемых для поиска и исследования возможного сигнала распада тяжелой темной материи. Полученные оценки являются важными для определения стратегии дальнейшего поиска тяжелой темной материи в действующих и планируемых экспериментах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Получены наиболее сильные на сегодняшний день консервативные ограничения на время жизни темной материи, состоящей из частиц с массами $10^7 \leq M_\chi \leq 10^{16}$ ГэВ, распадающихся в адроны. Ограничения установлены путем анализа наблюдательных данных о диффузном потоке фотонов с энергиями выше 100 ТэВ.
2. Получены консервативные ограничения на время жизни тяжелой темной материи, распадающейся в адроны, следующие из наблюдательных данных о диффузном потоке нейтрино с энергиями выше 100 ТэВ. Показано, что данные ограничения не превосходят фотонных ограничений почти для всех масс M_χ .
3. Показано, что интерпретация нейтрино, зарегистрированных в эксперименте IceCube, в качестве продукта адронного распада тяжелой темной материи, не поддерживается фотонными ограничениями на время ее жизни.
4. Получены консервативные ограничения на время жизни тяжелой темной материи, распадающейся в адроны, следующие из наблюдательных данных об анизотропии космических лучей с энергиями выше 100 ТэВ. Показано, что данные ограничения не превосходят

фотонных ограничений.

5. Получена оценка уровня чувствительности экспериментов по регистрации широких атмосферных ливней к анизотропии космических лучей, производимой адронным распадом тяжелой темной материи.
6. Показано, что наиболее перспективным направлением поиска сигнала адронного распада тяжелой темной материи является поиск фотонов ультравысоких энергий в экспериментах по регистрации широких атмосферных ливней, тогда как исследования анизотропии и нейтринного сигнала могут быть вспомогательными инструментами для выяснения происхождения обнаруженного фотонного сигнала.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертации доложены на научном семинаре Отдела теоретической физики ИЯИ РАН и на следующих конференциях:

1. 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, LPI RAS, Moscow, Russia, 22-28 August 2016.
2. Telescope Array Workshop on Anisotropies, ULB, Brussels, Belgium, 3-5 September 2016.
3. Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (HEA 2016), ИКИ РАН, Москва, Россия, 20-23 декабря 2016.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 2 статьях в рецензируемых научных изданиях [1, 2] и одном электронном препринте [3].

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 94 страницы, включая 18 рисунков. Библиография включает 169 наименований на 17 страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе рассматриваются физические процессы на которых основан непрямой поиск темной материи. В том числе, процесс распада тяжелой темной материи и процессы распространения различных продуктов распада через межзвездную среду, описываемые на языке физики элементарных частиц. Также рассматриваются космофизические свойства темной материи, важные для ее непрямого детектирования, в частности, распределение темной материи во Вселенной.

В разделе 1.1 "Физика распада темной материи" описана процедура вычисления спектров распада частиц X , составляющих тяжелую темную материю. Распад описывается в терминах "первичных" каналов, таких как, например, $X \rightarrow q\bar{q}$, при этом подразумевается адронизация образующегося каскада. Обзор конкретных моделей темной мате-

рии, которые могут быть описаны в таком походе, дан, например, в работе [6]. Все результаты, полученные в данной диссертации, основаны на спектрах распада частиц X вычисленных с помощью фрагментационных функций. К преимуществам данного метода относятся: высокая скорость вычислений и возможность получения результатов для сколь угодно большой массы частиц темной материи M_X , к недостаткам: относительно низкая точность и ограниченность применимости этого подхода адронными каналами распада. В работе рассматривается диапазон масс $10^7 \leq M_X \leq 10^{16}$ ГэВ. Спектр адронов, рождающихся в распаде частицы X , дается интегралом:

$$\frac{1}{\Gamma_X} \frac{d\Gamma^h}{dx} \equiv F^h(x, s) = \sum_i \int_x^1 \frac{dz}{z} C_i(z, \alpha_s(s)) D_i^h\left(\frac{x}{z}, s\right) \quad (1)$$

где Γ_X — полная ширина частицы X , Γ^h — ширина распада X в адроны типа h , $x \equiv \frac{2-E}{M_X}$ — доля всей освобождающейся в процессе энергии, приходящаяся на один адрон, $D_i^h(x, s)$ — функция фрагментации адрона типа h из партона типа i , $C_i(z, \alpha_s(s))$ — коэффициентные функции и суммирование идет по всем типам партонов $i = \{u, \bar{u}, d, \bar{d}, \dots, g\}$.

Для получения спектров на масштабе массы M_X используются уравнения Докшицера–Грибова–Липатова–Альтарелли–Паризи, решаемые численно в ведущем порядке по $\alpha(s)$ с помощью программного кода, предоставленного авторами работы [7]. При этом в качестве исходных фрагментационных функций используются функции, полученные в работе [8], параметризованные на масштабе 1 ГэВ, усредненные по ароматам кварков и линейно экстраполированные в область $10^{-5} \leq x \leq 1$. Интересующие нас спектры фотонов, нейтрино и протонов получают из найденных спектров адронов аналитически. При этом мы учитываем только

вклад пионов, пренебрегая $\sim 10\%$ вкладом других мезонов, мы также пренебрегаем электрослабыми поправками к каскаду, величина которых составляет не более 1% . В экспериментально интересной области малых x , соотношение потоков протонов фотонов и нейтрино составляет примерно $1 : 6 : 10$.

В разделе 1.2 ”Распространение продуктов распада темной материи в межзвездной среде“ рассматриваются различные эффекты, влияющие на распространение высокоэнергичных частиц, генерируемых в распаде темной материи, от места возникновения до Земли. В зависимости от типа частиц, их энергии и расположения источников эти эффекты существенно различаются. Поток частиц, генерируемый распадающейся темной материей, пропорционален ее плотности ρ_{DM} . В связи с этим мы рассматриваем полный поток частиц достигающий Земли как сумму усредненных потоков от распада темной материи в Галактике и в остальной части Вселенной, пренебрегая более тонкими эффектами кластеризации темной материи.

Потоки частиц от распада темной материи в гало Млечного Пути и в остальной Вселенной имеют вид, соответственно:

$$\frac{dF^G}{dE}(E) = \frac{1}{4\pi\tau M_X} \cdot \frac{dN}{dE}(E) \int_V \frac{\rho_{DM}(R[r])}{4\pi r^2} dV ; \quad (2)$$

$$\frac{dF^{EG}}{dE}(E) = \frac{1}{4\pi M_X \tau} \int_0^\infty \frac{\rho_0 c/H_0}{\sqrt{\Omega_{DM}(1+z)^3 + (1-\Omega_{DM})}} \frac{dN}{dE}(E(1+z)) dz \quad (3)$$

где τ — время жизни частиц темной материи, M_X — их масса, $\rho_{DM}(R)$ — плотность темной материи как функция расстояния от Галактического Центра R , r — расстояние от Земли, $\frac{dN}{dE}(E)$ — дифференциальный спектр

конечных частиц производимых в распаде частицы X , V — объем гало Млечного Пути, $c/H_0 = 1.37 \cdot 10^{28}$ см — Хаббловская длина, $\rho_0 = 1.15 \cdot 10^{-6}$ ГэВ/см³ — средняя космологическая плотность темной материи в настоящее время и $\Omega_{DM} = 0.27$ — плотность темной материи в долях критической плотности.

На распространение фотонов с энергиями более 100 ТэВ через межзвездную среду влияние оказывают рассеяние на реликтовом микроволновом фоне и радиодфоне, причем длина затухания оказывается такой, что галактический поток существенно превосходит внегалактический, которым мы пренебрегаем. В работе учитывается изменение спектра галактических фотонов вследствие электромагнитных каскадов, вызванных рассеянием фотонов на фоновых излучениях. В то же время, не учитывается вклад величиной $< 10\%$ от обратного комптоновского рассеяния электронов и позитронов, рожденных в распадах π^\pm мезонов, на межзвездном фотонном фоне.

Для потока нейтрино взаимодействием с межзвездной средой можно пренебречь даже на космологических расстояниях. Итоговый поток складывается из галактического и внегалактического вкладов, причем первый примерно в два раза превосходит второй. Также необходимо учитывать эффект осцилляций, что для непрерывного распределения источников и ароматового состава генерируемого в распадах π^\pm мезонов дает на Земле полностью перемешанный состав $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$

Поток протонов, генерируемый в распаде темной материи, рассмотрен с точки зрения его вклада в анизотропию космических лучей. Показано, что для известных оценок галактического магнитного поля, галактический поток протонов с энергиями менее $E_c \simeq 0.3$ ЭэВ полностью

изотропизуется.

Во второй главе обсуждается поиск космических фотонов с энергиями превышающими 100 ТэВ. Кратко описываются способы детектирования таких фотонов. Наиболее актуальные экспериментальные данные сопоставляются с теоретическими предсказаниями на поток фотонов от распада темной материи, полученными в Главе 1. Исходя из этого сопоставления выводятся ограничения на параметры темной материи.

В разделе 2.1 "Наблюдение космических фотонов высоких энергий" дается обзор существующих наблюдательных ограничений на диффузный поток фотонов с энергиями превосходящими 100 ТэВ.

В разделе 2.2 "Вывод ограничений на параметры темной материи из данных о потоке фотонов высоких энергий" ограничения на время жизни тяжелой темной материи устанавливаются путем сопоставления модельного потока фотонов от распада темной материи, вычисленного в Главе 1 с экспериментальными верхними пределами на поток фотонов. При этом учитывается неоднородность экспозиции конкретных экспериментов. Производится сканирование по параметрам M_χ и τ темной материи, при этом модель с данными параметрами считается исключенной данным экспериментом если модельный поток достигает хотя бы одного из пределов этого эксперимента. Итоговые ограничения представлены на Рис. 1.

Среди различных экспериментов наиболее сильные ограничения даются данными Pierre Auger, KASCADE-Grande, CASA-MIA и KASCADE. Данные ограничения являются наиболее сильными и из существующих консервативных ограничений на время жизни темной материи. Важно отметить, что разрешенные потоки фотонов от распада темной материи

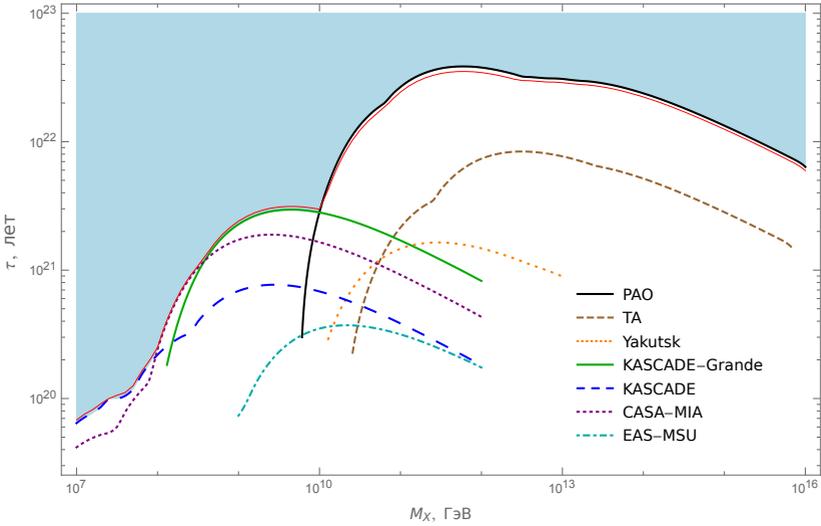


Рис. 1. Ограничения на время жизни τ частиц темной материи в зависимости от их масс M_χ , полученные с помощью пределов на диффузный поток фотонов, найденных экспериментами: Telescope Array [9] (95% C.L.), Pierre Auger [10, 11] (95% C.L.), Якутск [12] (95% C.L.), CASA-MIA [13] (90% C.L.), KASCADE [14] (90% C.L.), KASCADE-Grande [15] (90% C.L.) и ШАЛ-МГУ [16] (90% C.L.). Белая область параметров исключена. Для всех экспериментов использовано распределение темной материи NFW. Для сравнения мы приводим ограничения полученные с использованием распределения темной материи Буркерта (тонкая сплошная красная линия).

оказываются одного порядка величины с предсказываемыми космогенными потоками и потоками от pp взаимодействия в гало Галактики. Таким образом, в случае детектирования фотонов, с энергией превосходящей 100 ТэВ, для выяснения их происхождения будет необходимо рассмотреть дополнительные наблюдаемые, такие как анизотропия фотонного сигнала.

Результаты второй главы опубликованы в работе [1].

В третьей главе обсуждаются экспериментальные данные о потоке космических нейтрино с энергиями превышающими 100 ТэВ. Кратко описываются способы детектирования таких нейтрино. Наиболее актуальные данные сопоставляются с теоретическими предсказаниями на поток нейтрино от распада темной материи, полученными в Главе 1. Исходя из этого сопоставления устанавливаются ограничения на параметры темной материи и рассматривается интерпретация нейтринных событий зарегистрированных в эксперименте IceCube в качестве продукта распада тяжелой темной материи.

В разделе 3.1 "Наблюдение космических нейтрино высоких энергий" обсуждаются особенности экспериментальной регистрации нейтрино высоких энергий. Поскольку экспозиция нейтринных экспериментов и нейтринная экспозиция экспериментов ШАЛ зависит не только от направления но и от энергии нейтрино, адекватной наблюдаемой величиной является не дифференциальный поток частиц, как в случае фотонов, а число зарегистрированных нейтринных событий, представляющее из себя свертку нейтринного спектра с экспозицией данного эксперимента. При этом соответствующие ограничения на поток нейтрино зависят от формы ограничиваемого модельного спектра. Выводится выражение для

числа нейтрино от распада тяжелой темной материи регистрируемых в некотором эксперименте. Затем, обсуждаются современные экспериментальные данные о нейтрино сверхвысоких энергий. В качестве таковых выступают наиболее актуальные данные эксперимента IceCube [17] и данные эксперимента Pierre Auger об отсутствии нейтринных событий с энергиями $E_\nu \gtrsim 10^{17}$ эВ [18].

В разделе 3.2 "Вывод ограничений на параметры темной материи из данных о потоке нейтрино высоких энергий" на основании данных IceCube и Pierre Auger устанавливаются ограничения на время жизни тяжелой темной материи. Процедура сканирования параметров отличается от использованной с фотонными данными и заключается в генерировании Монте–Карло наборов событий, регистрируемых данной установкой в предположении модели темной материи с данными параметрами M_χ и τ , с последующим сопоставлением этих наборов и экспериментальных данных согласно технике Фельдмана–Казинса [19]. Полученные таким образом ограничения приведены на Рис. 2.

Можно видеть, что фотонные ограничения перекрывают нейтринные почти на всем рассматриваемом интервале масс темной материи, за исключением узкой области около значения $M_\chi \simeq 10^8$ ГэВ, где нейтринные ограничения несколько сильнее. Из этого можно сделать вывод, что интерпретация нейтринных событий IceCube в качестве продукта адронного распада темной материи с большой вероятностью входит в противоречие с фотонными ограничениями. Как и в Главе 2 разрешенные потоки нейтрино от распада темной материи сравниваются с конкурирующими предсказаниями астрофизических и космогенных моделей происхождения нейтрино. Показывается, что диффузные потоки нейтрино различ-

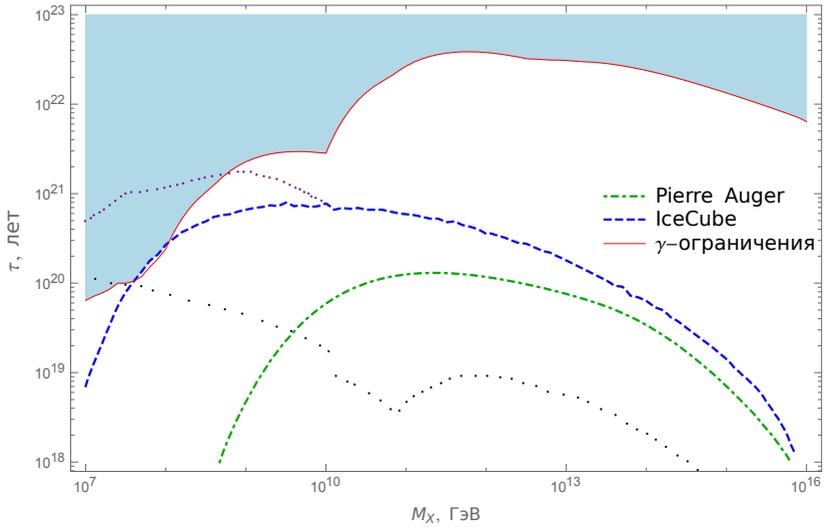


Рис. 2. Ограничения на время жизни τ частиц темной материи в зависимости от их масс M_X , установленные с уровнем достоверности 90%, с помощью данных о потоке диффузных нейтрино найденных в экспериментах IceCube [17] и Pierre Auger [18]. Белая область исключена совместно фотонными (тонкая сплошная красная линия) и нейтринными пределами. Для сравнения приведены ограничения для модели темной материи с каналом распада $X \rightarrow \nu\bar{\nu}$, полученные на базе старых данных IceCube [20] (черные точки), а также ограничения на темную материю распадающуюся через канал $X \rightarrow b\bar{b}$, полученные в недавней работе [6] в предположении, что все нейтринные события зарегистрированные IceCube имеют астрофизическое происхождение (фиолетовые точки).

ного происхождения имеют сходную величину и форму спектра, в связи с чем инструментом для выяснения происхождения нейтрино может стать исследование их галактической анизотропии и сопутствующего потока фотонов, в случае если последний будет зарегистрирован.

Результаты третьей главы опубликованы в работе [2].

В четвертой главе рассматривается роль анизотропии направлений прихода космических лучей в поиске сигнала распада тяжелой темной материи. Обсуждаются способы экспериментально наблюдения анизотропии и существующие данные экспериментов по детектированию ШАЛ. Исходя из этих данных устанавливаются ограничения на время жизни темной материи с массами $10^7 \leq M_X \leq 10^{16}$ ГэВ и рассматриваем соотношение этих ограничений с фотонными и нейтринными ограничениями, полученными в Главах 2 и 3. Также рассматриваются перспективы существующих и запланированных экспериментов ШАЛ для измерения анизотропии космических лучей высоких энергий. Оценивается чувствительность экспериментов, необходимая для детектирования сигнала от распада темной материи с маргинально разрешенными параметрами.

В разделе 4.1 “Наблюдение анизотропии направлений прихода космических лучей высоких энергий” обсуждается моделирование предсказываемой анизотропии космических лучей, порождаемой потоком частиц от распада тяжелой темной материи. Полный поток космических лучей представляется в виде суммы изотропной “экспериментальной” компоненты и анизотропной компоненты от распада темной материи в Галактике:

$$J_{\text{tot}}(\delta, \alpha, E) = J_{\text{exp}}(E) + J_{\text{DM}}(\delta, \alpha, E), \quad (4)$$

где $\{\delta, \alpha\}$ — координаты на небесной сфере. Причем, при исследованных энергиях космических лучей, вплоть до $E = 10^{20}$ эВ, изотропный вклад является доминирующим. Обсуждается целесообразность учета вкладов фотонов, протонов, и нейтрино от распада темной материи в Галактике и вне нее. Делается вывод о том, что единственными релевантными вкладами в анизотропию являются вклад галактических фотонов и, при энергиях выше 10^9 эВ, вклад галактических протонов.

В разделе 4.2 “Вывод ограничений на параметры темной материи из данных об анизотропии космических лучей высоких энергий” рассматриваются данные различных экспериментов по детектированию широких атмосферных ливней о анизотропии космических лучей с энергиями от 100 ТэВ и выше. Описываются наиболее распространенные наблюдаемые, используемые для представления экспериментальных результатов: амплитуда первой гармоники Фурье-анализа потока космических лучей по прямому восхождению, коэффициенты гармонического разложения потока по сферическим функциям и его угловой спектр мощности. Выражения для данных величин выводятся в предположении модели потока космических лучей рассмотренной в предыдущем разделе.

Далее, ограничения на параметры темной материи выводятся путем сопоставления модельных значений наблюдаемых, с экспериментальными верхними пределами, по аналогии с процедурой использованной при выводе ограничений из пределов на поток фотонов. Итоговый набор ограничений приведен на Рис. 3.

Можно видеть, что ограничения получаемые из данных об анизотропии космических лучей уступают фотонным ограничениям. Основываясь на этом, мы вычисляем уровень анизотропии космических лучей, пред-

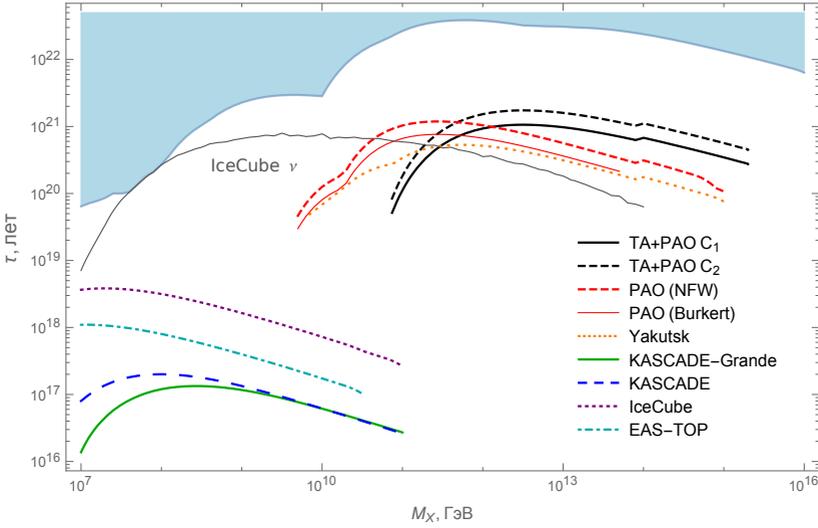


Рис. 3. Ограничения на время жизни τ частиц темной материи в зависимости от их масс M_χ , из данных об анизотропии космических лучей, полученных экспериментами: Telescope Array и Pierre Auger [21] (первая и вторая гармоника); Pierre Auger [22], Yakutsk [23], IceCube [24], EAS-TOP [25], KASCADE [26] и KASCADE-Grande [27]. Для всех экспериментов кроме KASCADE-Grande уровень достоверности составляет 95%, для KASCADE-Grande — 99%. Для всех экспериментов использовано распределение темной материи NFW. Для сравнения приведены ограничения полученные с использованием распределения темной материи Буркерта и данных Pierre Auger [22]. Область параметров исключенная фотонными и нейтринными пределами показана белым. Также, для сравнения показаны нейтринные ограничения IceCube из Главы 3.

сказываемой моделями тяжелой темной материи с разрешенными параметрами. Предсказываемая анизотропия оказывается как минимум в 20 раз более слабой, чем доступная к измерению в существующих экспериментах, что делает ее детектирование трудно достижимым в ближайшей перспективе.

В разделе 4.3 “Обсуждение роли различных наблюдаемых в прямом поиске тяжелой темной материи” рассматривается соотношение между фотонными, нейтринными и анизотропийными наблюдаемыми в контексте прямого поиска тяжелой темной материи. Делается вывод о том, что с учетом проектов усовершенствования существующих экспериментальных установок по детектированию широких атмосферных ливней, наиболее перспективным направлением первичного поиска сигнала распада тяжелой темной материи является поиск фотонов, производимых в этих распадах, тогда как анализ нейтринных и анизотропийных наблюдаемых может быть инструментом для выяснения происхождения возможного фотонного сигнала.

Результаты четвертой главы опубликованы в работе [3].

В Заключении приводится краткая сводка результатов работы. Также обсуждаются направления возможного уточнения полученных результатов.

Список публикаций

1. Kalashev O. K., Kuznetsov M. Yu. Constraining heavy decaying dark matter with the high energy gamma-ray limits // *Phys. Rev.* 2016. Vol. D94, no. 6. P. 063535. [arXiv:astro-ph.HE/1606.07354](https://arxiv.org/abs/1606.07354).

2. Kuznetsov M. Yu. Hadronically decaying heavy dark matter and high-energy neutrino limits // *JETP Lett.* 2017. [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 105, no.9, 533 (2017)]. [arXiv:astro-ph.HE/1611.08684](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1611.08684).
3. Kalashev O. E., Kuznetsov M. Yu. Heavy decaying dark matter and large-scale anisotropy of high-energy cosmic rays. 2017. [arXiv:astro-ph.HE/1704.05300](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1704.05300).

Цитированная литература

4. Aartsen M. G. et al. Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector // *Science*. 2013. Vol. 342. P. 1242856. [arXiv:astro-ph.HE/1311.5238](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1311.5238).
5. Aartsen M. G. et al. Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data // *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 113. P. 101101. [arXiv:astro-ph.HE/1405.5303](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1405.5303).
6. Cohen T., Murase K., Rodd N. L. et al. Gamma-ray Constraints on Decaying Dark Matter and Implications for IceCube. 2016. [arXiv:hep-ph/1612.05638](https://arxiv.org/abs/hep-ph/1612.05638).
7. Aloisio R., Berezhinsky V., Kachelriess M. Fragmentation functions in SUSY QCD and UHECR spectra produced in top - down models // *Phys. Rev.* 2004. Vol. D69. P. 094023. [arXiv:hep-ph/hep-ph/0307279](https://arxiv.org/abs/hep-ph/hep-ph/0307279).
8. Hirai M., Kumano S., Nagai T. H., Sudoh K. Determination of fragmentation functions and their uncertainties // *Phys. Rev.* 2007. Vol. D75. P. 094009. [arXiv:hep-ph/hep-ph/0702250](https://arxiv.org/abs/hep-ph/hep-ph/0702250).

9. Rubtsov G. I., Fukushima M., Ivanov D. et al. Telescope Array search for photons and neutrinos with the surface detector data // PoS. 2016. Vol. ICRC2015. P. 331.
10. Bleve C. Updates on the neutrino and photon limits from the Pierre Auger Observatory // PoS. 2016. Vol. ICRC2015. P. 1103.
11. Aab A. et al. Search for photons with energies above 10^{18} eV using the hybrid detector of the Pierre Auger Observatory // JCAP. 2017. Vol. 1704, no. 04. P. 009. [arXiv:astro-ph.HE/1612.01517](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1612.01517).
12. Glushkov A. V., Makarov I. T., Pravdin M. I. et al. Constraints on the flux of primary cosmic-ray photons at energies $E > 10^{18}$ eV from Yakutsk muon data // Phys. Rev. 2010. Vol. D82. P. 041101. [arXiv:astro-ph.HE/0907.0374](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/0907.0374).
13. Chantell M. C. et al. Limits on the isotropic diffuse flux of ultrahigh-energy gamma radiation // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 79. P. 1805–1808. [arXiv:astro-ph/9705246](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9705246).
14. Schatz G. et al. Search for extremely high energy gamma rays with the KASCADE experiment // Proceedings, 28th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2003): Tsukuba, Japan, July 31-August 7, 2003. 2003. P. 2293–2296. URL: <http://www-rccn.icrr.u-tokyo.ac.jp/icrc2003/PROCEEDINGS/PDF/566.pdf>.
15. Kang D. et al. A limit on the diffuse gamma-rays measured with KASCADE-Grande // J. Phys. Conf. Ser. 2015. Vol. 632, no. 1. P. 012013.
16. Fomin Yu. A., Kalmykov N. N., Karpikov I. S. et al. Constraints on the

- flux of $\sim (10^{16} - 10^{17.5})$ eV cosmic photons from the EAS-MSU muon data. 2017. [arXiv:astro-ph.HE/1702.08024](https://arxiv.org/abs/1702.08024).
17. Aartsen M. G. et al. Constraints on Ultrahigh-Energy Cosmic-Ray Sources from a Search for Neutrinos above 10 PeV with IceCube // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 117, no. 24. P. 241101. [arXiv:astro-ph.HE/1607.05886](https://arxiv.org/abs/1607.05886).
 18. Aab A. et al. Improved limit to the diffuse flux of ultrahigh energy neutrinos from the Pierre Auger Observatory // *Phys. Rev.* 2015. Vol. D91, no. 9. P. 092008. [arXiv:astro-ph.HE/1504.05397](https://arxiv.org/abs/1504.05397).
 19. Feldman G. J., Cousins R. D. A Unified approach to the classical statistical analysis of small signals // *Phys. Rev.* 1998. Vol. D57. P. 3873–3889. [arXiv:physics.data-an/physics/9711021](https://arxiv.org/abs/physics.data-an/physics/9711021).
 20. Esmaili A., Ibarra A., Peres O. L. G. Probing the stability of superheavy dark matter particles with high-energy neutrinos // *JCAP*. 2012. Vol. 1211. P. 034. [arXiv:hep-ph/1205.5281](https://arxiv.org/abs/hep-ph/1205.5281).
 21. Aab A. et al. Searches for Large-Scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays Detected above Energy of 10^{19} eV at the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array // *Astrophys. J.* 2014. Vol. 794, no. 2. P. 172. [arXiv:astro-ph.HE/1409.3128](https://arxiv.org/abs/1409.3128).
 22. Al Samarai I. Indications of anisotropy at large angular scales in the arrival directions of cosmic rays detected at the Pierre Auger Observatory // *PoS*. 2016. Vol. ICRC2015. P. 372.
 23. Ivanov A. A., Krasilnikov A. D., Pravdin M. I., Sabourov A. V. Large-scale distribution of cosmic rays in right ascension as observed by the

- Yakutsk array at energies above 10^{18} eV // *Astropart. Phys.* 2015. Vol. 62. P. 1–6. [arXiv:astro-ph.HE/1407.1583](#).
24. Aartsen M. G. et al. Anisotropy in Cosmic-ray Arrival Directions in the Southern Hemisphere Based on six Years of Data From the Icecube Detector // *Astrophys. J.* 2016. Vol. 826, no. 2. P. 220. [arXiv:astro-ph.HE/1603.01227](#).
25. Aglietta M. et al. Evolution of the cosmic ray anisotropy above 10^{14} eV // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 692. P. L130–L133. [arXiv:astro-ph.HE/0901.2740](#).
26. Antoni T. et al. Large scale cosmic - ray anisotropy with KASCADE // *Astrophys. J.* 2004. Vol. 604. P. 687–692. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0312375](#).
27. Chiavassa A. et al. A study of the first harmonic of the large scale anisotropies with the KASCADE-Grande experiment // *PoS.* 2016. Vol. ICRC2015. P. 281.

Научное издание

Кузнецов Михаил Юрьевич

Поиск тяжелой темной материи
методами астрофизики частиц высоких энергий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60х84/16 Уч.-изд.л. 1,1 Зак. № 22416 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