

О Т З Ы В

официального оппонента доктора физико-математических наук Рябова Владимира Алексеевича на диссертацию Кузнецова Михаила Юрьевича «Поиск тяжелой темной материи методами астрофизики частиц высоких энергий», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика

Выяснение природы темной материи является одной из наиболее интересных проблем современной фундаментальной физики. Важной особенностью данной проблемы является ее тесная связь с экспериментом, выражающаяся как в многочисленных экспериментальных указаниях на наличие во Вселенной существенного количества небарионной материи, так и в широких возможностях экспериментальной проверки различных моделей темной материи. Двумя основными направлениями поиска темной материи являются прямой поиск ее частиц в лабораторных экспериментах и поиск ее косвенных проявлений в астрофизических наблюдениях. При этом, для некоторых моделей темной материи непрямой поиск является единственным доступным на сегодняшний день способом их проверки. Непрямая проверка одного класса таких моделей, а именно моделей темной материи состоящей из тяжелых метастабильных частиц, выполнена в диссертации М.Ю. Кузнецова.

Актуальность данной работы определяется тем, что поиск сигнала от распада частиц тяжелой темной материи ведется с помощью современных методов астрофизики частиц высоких энергий, которые подразумевают совместный анализ наблюдаемых величин, связанных с различными частицами и излучениями, в данном случае это потоки космических фотонов, нейтрино и заряженных частиц. В рамках этой задачи М.Ю. Кузнецовым проделано комплексное моделирование сигнала тяжелой темной материи, включающее в себя численное моделирование спектров распада частиц темной материи в фотоны, нейтрино и протоны, моделирование распространения данных частиц через межзвездную среду, определение вклада данных потоков частиц в наблюдаемые величины, получаемые на установках по регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Для каждого типа сигнала проведено сравнение наблюдаемых величин с соответствующими экспериментальными результатами, полученными на современных установках, регистрирующих ШАЛ, а также на нейтринных телескопах.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав основного содержания, Заключения и списка литературы. Во введении дается краткий обзор современных достижений, связанных с применением так называемого многокомпонентного (multimessenger) подхода в астрофизике частиц высоких энергий. Кратко описывается история исследований проблемы поиска темной материи и современное состояние этой области физики — приводятся основные

экспериментальные указания в пользу класса моделей, где темная материя описывается нерелятивистскими частицами (CDM-модели). Кратко описывается наиболее изученный класс моделей темной материи — слабо-взаимодействующие массивные частицы (WIMP), а также тяжелые долгоживущие частицы, являющиеся предметом настоящей диссертации. Также дается краткий обзор методов непрямого детектирования сигнала распада темной материи. Обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость исследования, устанавливаются его цели и задачи, а также приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе подробно описывается вычисление сигнала от распада тяжелой темной материи. Обосновывается выбор метода фрагментационных функций для вычисления спектров распада частиц темной материи, описывается применение и результаты этого метода. Исследуется модификация полученных спектров распада, связанная с распространением частиц через межзвездную среду, исследуются галактический и внегалактический вклады в общий поток частиц. Спектры частиц, достигающие Земли, используются в последующих главах для сравнения предсказаний моделей тяжелой темной материи с результатами различных экспериментов.

Во второй главе смоделированный сигнал от распада частиц тяжелой темной материи в фотоны высоких энергий рассматривается в контексте современных данных ШАЛ-экспериментов о потоке таких фотонов. При энергиях более 100 ТэВ фотоны не были обнаружены, что позволяет использовать верхние пределы на их поток для ограничения времени жизни частиц тяжелой темной материи. В диссертации ограничения на время жизни частиц темной материи с массой от 10^7 до 10^{16} ГэВ выводятся с использованием данных о ненаблюдении фотонов с энергиями от 10^{14} до 10^{20} эВ. Полученные в диссертации ограничения являются наиболее сильными из существующих на сегодняшний день для соответствующих моделей темной материи.

В третьей главе рассматривается возможный сигнал распада частиц тяжелой темной материи в нейтрино. Последние данные эксперимента IceCube по наблюдению потока нейтрино ПэВ-ных энергий и ограничения на нейтринные потоки, полученные в эксперименте Pierre Auger сопоставляются с модельными спектрами нейтрино, найденными в первой главе. На основании получаемых ограничений на время жизни темной материи и их сравнения с ограничениями, полученными в главе 2, делается вывод о неправдоподобии гипотезы объяснения наиболее энергичных нейтринных событий зарегистрированных в эксперименте IceCube распадом рассматриваемого типа частиц тяжелой темной материи.

В четвертой главе исследуется возможный вклад потоков высокоэнергичных частиц от распада частиц тяжелой темной материи в анизотропию космических лучей. Как и в предыдущих двух главах, на основании современных экспериментальных данных об анизотропии

космических лучей сверхвысоких и ультравысоких энергий выводятся ограничения на время жизни тяжелой темной материи, которые оказываются более слабыми, чем ограничения, следующие из данных о фотонах и нейтрино. На основании анализа полного набора ограничений, полученных в рамках диссертации, делается вывод о том, что наиболее перспективным направлением для возможного обнаружения сигнала распада частиц тяжелой темной материи является поиск фотонов высоких энергий. Исследование нейтрино высоких энергий и анизотропии потоков различных высокоэнергичных частиц может использоваться для установления происхождения детектированного фотонного сигнала.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Новизна диссертации заключается в том, что в данной работе впервые сделано сравнение эффективностей различных астрофизических методов непрямого поиска частиц тяжелой темной материи.

Практическая значимость данного исследования состоит в возможности использования его результатов для определения стратегии поиска сигнала распада частиц темной материи в существующих и планируемых экспериментах по регистрации космических частиц высоких энергий.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений основана на том, что диссертация прошла достаточную апробацию. Результаты, полученные М.Ю.Кузнецовым, докладывались на 3 российских и международных конференциях и совещаниях. Основные результаты М.Ю.Кузнецова, вошедшие в диссертацию, представлены в 3 статьях, две из которых опубликованы в ведущих международных журналах и хорошо известны специалистам. Таким образом, результаты работы М.Ю.Кузнецова успешно прошли независимую научную экспертизу и являются достоверными и обоснованными.

К недостаткам диссертации следует отнести отсутствие подробного разъяснения метода получения ограничений на время жизни темной материи, который является ключевым для данной работы. В частности, не указано, чем обусловлен выбор диапазонов масс темной материи, ограничения для которых выводятся из данных каждого конкретного эксперимента.

Во вступительной части главы 3 указано, что в ней выводятся ограничения на поток нейтрино от распада темной материи, тогда как в действительности предметом главы является вывод ограничений на время жизни частиц темной материи, а ограничения на поток нейтрино не рассматриваются. В качестве экспериментальной наблюдаемой величины в данной главе также рассматривается не поток нейтрино, а число зарегистрированных событий. В данном случае, следовало бы формулировать рассматриваемую задачу более точно.

В главах 3 и 4 не разъяснена специфика получения ограничений в случае, когда рассматриваемая величина — число нейтринных событий и амплитуда

дипольной анизотропии соответственно — экспериментально измерена и имеет конечное значение. Возможно, в этом случае следовало бы говорить не об ограничении моделей темной материи, а возможности объяснения с их помощью экспериментальных данных.

В главе 4 следует отметить вводящие в заблуждение названия разделов — в разделе 4.1 «Наблюдение анизотропии направлений прихода космических лучей высоких энергий» речь в действительности идет о предположениях, используемых автором при построении модельного потока космических лучей, тогда как методика экспериментального исследования анизотропии космических лучей обсуждается в разделе 4.2 «Вывод ограничений на параметры темной материи из данных об анизотропии космических лучей высоких энергий».

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию. Диссертация М.Ю.Кузнецова «Поиск тяжелой темной материи методами астрофизики частиц высоких энергий» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Диссертация М.Ю.Кузнецова соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а сам Михаил Юрьевич Кузнецов, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика.

Официальный оппонент,
заместитель директора ФИАН,
доктор физико-математических наук

Рябов В.А.
3 августа 2017 г.

E-mail: ryabov@x4u.lebedev.ru
Тел.: 8-499-132-61-42

119991, ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук (ФИАН), г. Москва,
Сайт: www.lebedev.ru.

Подпись В.А. Рябова заверяю,
Ученый секретарь ФИАН,
кандидат физико-математических наук

Колобов А.В.

Рябов Владимир Алексеевич
доктор физико-математических наук, профессор
специальность 01.04.23 – Физика высоких энергий

Список основных публикаций по теме диссертации за 2012-2017 гг.:

1. Gusev G.A., Chechin V.A., Lomonosov B.N., Polukhina N.G., and Ryabov V.A. // *Design of the LORD Experiment and Perspectives of Ultrahigh-Energy Particles Observation* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2012, v.662, pp. 99 – 102;
2. Gusev G.A., Chechin V.A., Lomonosov B.N., and Ryabov V.A. // *Targets and radio detectors in far-space region for registration of ultrahigh-energy cosmic rays and neutrino* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2012, v.662, pp. 103 – 105;
3. Gusev G.A., Chechin V.A., Ryabov V.A. // *Lunar Space Missions for Ultrahigh-energy Cosmic Rays and Neutrinos Observation* // AIP Conf. Proc. 1535, 37 (2013); doi: 10.1063/1.4807517 (International Workshop Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities (ARENA 2012), 19 - 22 June 2012, Erlangen, Germany);
4. Ryabov V.A., Gusev G.A. and Chechin V.A. // *LORD Space Experiment for Investigation of Ultrahigh Energy Cosmic-ray Particles* // Journal of Physics: Conference Series 2013, v. 409, Article Number 012096; (23rd European Cosmic Ray Symposium, ECRS-2012, 2012, 3-7 July, Moscow, Russia);
5. Beisembaev R.U., Vavilov Yu.N., Vildanova M.I.,..., Ryabov V.A. et al // *The first results obtained with the installation HORIZON-T* // Journal of Physics: Conference Series 2013, v. 409, Article Number 012127; (23rd European Cosmic Ray Symposium, ECRS-2012, 2012, 3-7 July, Moscow, Russia);
6. Golovashkin A.I., Izmailov G. N., Ryabov V. A., Tshovrebov A. M., Zherikhina L. N. // *Dark Matter Particle Detection System SQUID - Magnetic Calorimeter* // American Journal of Modern Physics, 2013; Vol. 2(4), pp. 208-216 // doi: 10.11648/j.ajmp.20130204.15, Science Publishing Group;
7. Borisov A.S., Chubenko A.P., Dalkarov, O.D.,..., Ryabov V.A. et al. // *HADRON-55 complex setup for study of hadron interactions within the central part of EAS cores* // Proceedings of Science, Volume 30-July-2015, 2015, Article number 570; 34th International Cosmic Ray Conference, ICRC 2015; The Hague; Netherlands; 30 July - 6 August 2015;
8. Adamson P., Ader C., Andrews M.,..., Ryabov V.A. et al. (NOvA Collaboration) // *First measurement of muon-neutrino disappearance in NOvA* // Phys. Rev. D, 2016, vol. 93., No. 5, p. 051104 (R) – Rapid Communication; arXiv:1601.05037 [hep-ex]; DOI: 10.1103/PhysRevD.93.051104;
9. Adamson P., Ader C., Andrews M.,..., Ryabov V.A. et al. (NOvA Collaboration) // *First measurement of electron neutrino appearance in NOvA* // Physical Review Letters, 2016, Vol. 116, p. 151806; arXiv:1601.05022 [hep-ex]; DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.151806;

10. Ryabov V.A., Chechin V.A., Gusev G.A., Maung K.T. // *Prospects for ultrahigh-energy particle observation based on the lunar orbital LORD space experiment* // *Advances in Space Research*, 58 (2016), 464 – 474 , DOI: 10.1016/j.asr.2016.04.030;
11. Chubenko A.P., Shepetov A.L., Antonova V.P.,..., Ryabov V.A. et al. // *New complex EAS installation of the Tien Shan mountain cosmic ray station* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 832 (2016), 158–178, DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.068;
12. Ryabov V.A., Almenova A.M., Antonova, V.P., et al. // *Modern status of the Tien-Shan cosmic ray station* // *EPJ Web of Conferences*, Volume 145, 26 June 2017, Article number 12001, 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 22 - 27 August 2016, Moscow, Russia; DOI: 10.1051/epjconf/201614512001;
13. Shaulov S.B., Beyl P.F., Beysembaev R.U., ..., Ryabov V.A., et al. // *Investigation of EAS cores* // *EPJ Web of Conferences*, Volume 145, 26 June 2017, Article number 17001, 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 22 - 27 August 2016, Moscow, Russia; DOI: 10.1051/epjconf/201614517001;
14. Beznosko D., Beissembaev R., Baigarin K., ..., Ryabov V.A., et al. // *Extensive Air Showers with unusual structure* // *EPJ Web of Conferences*, Volume 145, 26 June 2017, Article number 14001, 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 22 - 27 August 2016, Moscow, Russia; DOI: 10.1051/epjconf/201614514001;
15. Adamson P., Aliaga L., Ambrose D.,..., Ryabov V. et al. (NOvA Collaboration) // *Measurement of the neutrino mixing angle θ_{23} in NOvA* // *Physical Review Letters*, 2017, Vol. 118, p. 151802; arXiv:1701.05891 [hep-ex]; DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.151802;
16. Adamson P., Aliaga L., Ambrose D.,..., Ryabov V. et al. (NOvA Collaboration) // *Constraints on Oscillation Parameters from ν_e Appearance and ν_μ Disappearance in NOvA* // *Physical Review Letters*, 2017, Vol. 118, p. 231801; arXiv:1703.03328 [hep-ex]; DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.231801;