

## О Т З Ы В

**официального оппонента кандидата физико-математических наук  
Шаракина Сергея Александровича**

**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**

В настоящее время в наблюдательной астро- и космофизике происходит бурное развитие экспериментальных методик, запуск новых и активная эксплуатация уже действующих экспериментов. Это привело к накоплению беспрецедентного количества данных о космических излучениях различной природы и энергий. В то же время, происхождение существенной части этих сигналов не выяснено и задача установления их источников является особенно актуальной. В полной мере это относится к космическим лучам ультравысоких энергий, наблюдаемым уже на протяжении нескольких десятилетий, и нейтрино сверхвысоких энергий, относительно недавно зарегистрированным в эксперименте IceCube. Одним из возможных механизмов происхождения этих частиц является их генерация в распадах гипотетических частиц тяжелой темной материи. Диссертация М.Ю. Кузнецова посвящена исследованию этого сценария на основе современных данных экспериментов по детектированию широких атмосферных ливней (ШАЛ) и космических нейтрино сверхвысоких энергий.

В диссертации рассматривается модель темной материи, представляющей собой долгоживущие частицы с массами  $10^7 < M_X < 10^{16}$  ГэВ (тяжелая темная материя) и распадающиеся в адроны. Основная часть диссертации состоит из четырех глав. В первой главе вводится теоретическая база, необходимая для непрямого поиска сигнала распада тяжелой темной материи. В частности, вычисляются спектры распада частиц темной материи в фотоны, нейтрино и протоны, находится вклад различных космических структур (распределение) темной материи в общий поток частиц, а также учитываются поправки к спектру частиц, возникающие вследствие их взаимодействия с межзвездной средой. В последующих главах предсказываемые модельные сигналы сопоставляются с наблюдательными данными о потоках различных частиц, регистрируемых на Земле.

Вторая глава посвящена ограничению времени жизни частиц темной материи с помощью верхних пределов на диффузные потоки фотонов с энергиями выше 100 ТэВ. Эти ограничения оказываются наиболее сильными из полученных на сегодняшний день консервативных границ для темной материи таких масс. Поскольку современные фотонные пределы лежат в области предсказаний космогенных моделей генерации фотонов, то делается вывод о том, что в случае детектирования фотонов для выяснения их происхождения нужен будет анализ дополнительных наблюдаемых.

В третьей главе нейтринный сигнал от распада темной материи сопоставляется с актуальными нейтринными данными экспериментов IceCube и Pierre Auger. Выводятся соответствующие ограничения на время жизни темной материи, которые оказываются - почти при всех массах темной материи - слабее фотонных ограничений. На основании этого делается вывод о том, что интерпретация нейтринных событий IceCube в качестве продукта распада изучаемой модели темной материи плохо согласуется с фотонными ограничениями.

В четвертой главе та же модель темной материи рассматривается в свете данных об анизотропии космических лучей с энергиями от 100 ТэВ и выше. Путем сопоставления предсказываемой анизотропии с существующими экспериментальными верхними пределами

выводится еще один набор ограничений на время жизни темной материи. Эти ограничения также оказываются более слабыми, чем фотонные. Далее делается оценка чувствительности экспериментов, необходимой для различения анизотропии генерируемой распадом темной материи с минимальным временем жизни, разрешенным фотонными ограничениями. Такая чувствительность оказывается трудно достижимой для современных экспериментов, на основании чего делается вывод, что наиболее перспективной стратегией непрямого поиска тяжелой темной материи оказывается поиск высокоэнергичных фотонов.

Хочется отметить, что рассмотренные в диссертации задачи составляют целостное исследование возможных наблюдаемых проявлений тяжелой темной материи. Новизна полученных результатов заключается в выявлении относительной эффективности различных наблюдаемых в непрямом поиске тяжелой темной материи. Актуальность результатов диссертации, в частности, подтверждается вниманием специалистов, работающих в данной области к опубликованным в рамках диссертации работам.

Наряду с этим хотелось бы сделать несколько замечаний по поводу данной диссертационной работы.

- 1) Как уже было отмечено, автором исследуются только адронные каналы распада темной материи, что, с нашей точки зрения, существенно ограничивает предсказательную силу рассматриваемой модели. В частности, из текста работы не совсем понятна какова возможная «конкуренция» со стороны других каналов распада. Стоит подчеркнуть, такие довольно жесткие ограничения необходимы, чтобы свести решение поставленных задач к полу-аналитическим методам, что в конечном итоге позволило автору произвести вычисления для частиц темной материи сколь угодно большой массы.
- 2) В работе предпринята попытка проведения так называемого многокомпонентного исследования астрофизической проблемы (в англ. варианте *multimessenger approach*): ограничения на параметры темной материи выводятся, основываясь на данных по фотонным, нейтринным и экспериментам по космическим лучам. Однако в результате оказалось, что фотонные ограничения более значительны практически во всем диапазоне исследуемых параметров, и «помощь» от данных по двум другим компонентам не существенна или отсутствует вовсе. Таким образом, данное исследование скорее подчеркивает нетривиальность многокомпонентного подхода, чем на практике использует его преимущества. Однако даже такой подход позволил в главе 3 констатировать факт невозможности объяснения нейтринного сигнала IceCube распадом темной материи как раз путем сопоставления с фотонными ограничениями, а в одном из положений, выносимых на защиту по главе 4, говорится о том, что «исследования анизотропии и нейтринного сигнала могут быть вспомогательными инструментами для выяснения происхождения обнаруженного фотонного сигнала». Остается сожалеть, что данная возможность не разобрана в работе подробнее.
- 3) При анализе данных эксперимента IceCube полученные автором ограничения опираются на предельно низкую статистику нейтринных событий – в расчет приняты 2 события, удовлетворяющих поставленным условиям. Однако из диссертации не совсем ясно, как на эти выводы повлияло бы изменения данной статистики в ту или другую сторону (например, если после пересмотра критериев отбора таких событий станет не 2, а 1 или 4).
- 4) В главе, посвященной анизотропии космических лучей, в случае вычисления ограничений по коэффициентам  $a_{lm}$  разложения по сферическим гармоникам, уровень достоверности для фиксированного  $l$  «равномерно распределяется» по всем  $m$ , что, в

принципе, может привести к частичной потере чувствительности предлагаемой методики. Вероятно, имеет смысл разработка какой-то более продвинутой методики, учитывающей возможную неоднородность распределений.

- 5) В области частиц ультравысоких энергий имел бы смысл чуть более подробный анализ перспектив не только наземных установок, но и орбитальных экспериментов (о них автор упоминает лишь вскользь). Такой анализ, в частности, с одной стороны, мог бы привлечь большее внимание научного сообщества к данной диссертационной работе, а с другой – стать дополнительным обоснованием для развития спутниковых экспериментов в ближайшем будущем. Например, на рисунке 4.4 для сравнения приведены результаты аналогичного исследования Marzola L. et al. (ссылка [166] диссертационной работы), однако никак не прокомментировано наблюдающее (пусть и небольшое) различие результатов. Автор делает вывод, что в ближайшее время наиболее перспективными с точки зрения непрямого поиска темной материи в этой области энергий будет растущая чувствительность наземных экспериментов к фотонному сигналу, нежели рост чувствительности орбитальных детекторов к анизотропии. Представляется важным привести и количественные оценки данной «конкуренции».
- б) Наконец, стоит упомянуть и о наличии ряда пунктуационных ошибок, особенно во второй половине диссертации, а также некоторых необязательных заимствований: например, термин «симуляция» вполне можно было бы заменить на «численное моделирование» (что и сделано в отдельных случаях). При этом стоит подчеркнуть очень высокий уровень владения автором научным русским языком, что особенно было полезно при составлении данного отзыва.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации. Диссертация М. Ю. Кузнецова отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемого к кандидатским диссертациям, а ее автор М. Ю. Кузнецов бесспорно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика».

Официальный оппонент

научный сотрудник отдела космических наук НИИЯФ МГУ,  
кандидат физико-математических наук

Шаракин С.А.  
30.08.2017

E-mail: [sharakin@mail.ru](mailto:sharakin@mail.ru)

Тел.: +7-903-228-26-95

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), г. Москва

Подпись С.А. Шаракина заверяю

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ,  
кандидат физико-математических наук

Сигаева Е.А.

Шаракин Сергей Александрович

кандидат физико-математических наук, специальность 01.04.02 –  
Теоретическая физика, научный сотрудник отдела космических наук  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.  
Ломоносова», Научно-исследовательского института ядерной физики имени  
Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы,  
дом 1, строение 2

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

1. Adams J. H.,..., Sharakin S. A. et al. // *An evaluation of the exposure in nadir observation of the JEM-EUSO mission* // *Astropart. Phys.* 2013. Vol. 44. P. 76–90. arXiv:astro-ph.HE/1305.2478.
2. Khrenov B. A.,..., Sharakin S. A. et al. // *Pioneering space based detector for study of cosmic rays beyond GZK Limit* // *EPJ Web Conf.* 2013. Vol. 53. P. 09006.
3. Grinyuk A., Slunicka M., Tkachenko A.,..., Sharakin S. A. et al. // *The method and results of measurement of the optical parameters of the UHECR detector for the TUS space experiment* // *Nucl. Instrum. Meth.* 2014. Vol. A763. P. 604–609.
4. Panasyuk M. I.,..., Sharakin S. A. et al. // *The current status of orbital experiments for UHECR studies* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2015. Vol. 632, no. 1. P. 012097. arXiv:astro-ph.IM/1501.06368.
5. Garipov G. K., Zotov M. Yu., Klimov P. A.,..., Sharakin S. A. et al. // *The KLYPVE ultra-high energy cosmic ray detector on board the ISS* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. Vol. 79, no. 3. P. 326–328. [*Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz.*79,no.3,358(2015)].
6. Kajino F., Ebisuzaki T., Casolino M.,..., Sharakin S. A. et al. // *K-EUSO: An improved optical system for KLYPVE ultra-high energy cosmic ray space telescope* // *PoS.* 2016. Vol. ICRC2015. P. 634.
7. Panasyuk M. I., Klimov P., Khrenov B.,..., Sharakin S. A. et al. // *Ultra-high energy cosmic ray detector KLYPVE on board the Russian Segment of the ISS* // *PoS.* 2016. Vol. ICRC2015. P. 669.
8. Sakaki N., Fenu F., Takizawa Y.,..., Sharakin S. A. et al. // *Expected acceptance of the KLYPVE/K-EUSO space-based mission for the observation of ultra-high energy cosmic rays* // *PoS.* 2016. Vol. ICRC2015. P. 647.
9. Grinyuk A.,..., Sharakin S. A. et al. // *The orbital TUS detector simulation* // *Astropart. Phys.* 2017. Vol. 90. P. 93–97.
10. Abdellaoui G.,..., Sharakin S. A. et al. // *Cosmic ray oriented performance studies for the JEM-EUSO first level trigger* // *Nucl. Instrum. Meth.* 2017. Vol. A866. P. 150–163.