

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ОИЯИ

\_\_\_\_\_ В.А.Матвеев

«26» июля 2017 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации – Объединенного Института Ядерных Исследований - 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).

Исследования темной материи являются отдельной, быстро прогрессирующей областью науки, лежащей на стыке физики частиц, астрофизики и космологии. Как пишет автор диссертации, по данным системы SAO/NASA за 2016 год, ежедневно выходит в среднем 3 новых исследования, посвященных темной материи, а в интернет базе препринтов arXiv.org содержится в настоящее время более 14000 таких статей. Однако, несмотря на большие экспериментальные и теоретические усилия, направленные на ее решение, физическая природа темной материи остается неизвестной.

Диссертационная работа посвящена поиску сигнала распада тяжелой темной материи путем совместного анализа результатов измерений спектров космических гамма-квантов и нейтрино, а также анизотропии КЛ высоких энергий. Она состоит из введения, 4 глав основного текста, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 94 страницы, включая 18 рисунков. Библиография включает 169 наименований.

### **Введение**

Проблема темной материи возникла около ста лет тому назад, после того как была установлена связь между светимостью звезды и ее массой. Вследствие этого, естественно, должна быть также связь между полной светимостью галактики и ее массой. Измерение интегральной светимости звезд в галактике в зависимости от их расстояния до центра галактики позволяет вычислить соответствующую зависимость интегральной массы этих звезд как функцию расстояния до центра. Были выполнены многочисленные измерения угловых скоростей вращения галактик в зависимости от расстояния до центра, которые, как оказалось, не соответствуют расчетному радиальному распределению массы в галактике. Естественное объяснение наблюдаемого поведения ротационных кривых состоит в предположении о существовании добавочной невидимой (отсюда термин – темная (несветящаяся) материя) в оптическом диапазоне массы внутри заданного радиуса.

Существенно, что для приведения данных в соответствии с законом Кеплера, темной массы должно быть 5-7 раз больше по сравнению с массой светящихся звезд.

Кроме того, в настоящее время появились и другие, независимые, данные, понимание которых наиболее естественно в предположении существования темной гравитирующей материи: движение галактик внутри галактических скоплений, гравитационное линзирование и, наконец, интерпретация результатов прецизионного измерения анизотропии реликтового микроволнового излучения на спутниках COBE, WMAP и PLANCK. Измерения космических гамма-квантов и нейтрино с энергиями в сотни ТэВ увеличивают интерес к теоретическим исследованиям в этой области, представленным в работе диссертанта.

Трудно ожидать, что частиц темной материи может быть несколько, скажем в районе 1000 ГэВ и в области больше  $10^7$  ГэВ, которая представлена в диссертации. К сожалению, в диссертации отсутствует обсуждение результатов измерения спектра позитронов, измеренного в экспериментах ПAMEЛА, FERMI-LAT и AMS-2, для интерпретации которого привлекаются соображения об аннигиляции частиц темной материи с массой  $\sim 1$  ТэВ.

## Глава 1.

Это основная часть диссертации, в ней описаны физические процессы, на которых основан непрямой поиск темной материи: распад частицы тяжелой темной материи и распространение продуктов распада через межзвездную среду, а также распределение темной материи во Вселенной.

Моделью для реакции распада частицы  $X \rightarrow q + q\bar{q}$  является процесс  $e+e^- \rightarrow$  адроны. Спектр адронов, рождающихся в распаде частицы  $X$  вычисляется через функции фрагментации адронов из партонов и коэффициентные функции. Фрагментационные функции на некотором заданном масштабе энергии получаются из функций, заданных на исходном масштабе, путем учета нарушения скейлинга, которое описывается уравнениями Докшицера–Грибова–Липатова–Альтарелли–Паризи (ДГЛАП), которые решаются численно. В качестве исходных фрагментационных функций используются функции, параметризованные на масштабе 1 ГэВ, усредненные по ароматам кварков и экстраполированные в область  $10^{-5} \leq x \leq 1$ . Было проверено и это существенно, что результаты подобного численного решения на интервале от 1 ГэВ до  $10^7$  ГэВ согласуются с результатами Монте-Карло симуляций этих же процессов.

Получены спектры стабильных частиц из найденных спектров адронов аналитически. Общая теоретическая неопределенность итогового спектра обусловлена неопределенностью пионных фрагментационных функций. Удивительно, что учет нарушения скейлинга не приводит к заметному изменению спектров при изменении массы частицы  $X$  от  $10^7$  до  $10^{16}$  ГэВ.

Распространение продуктов распада темной материи в межзвездной среде: показано, что вклад темной материи, содержащейся в Млечного Пути и гало, превосходит внегалактический вклад. Распределение темной материи: в данной работе все результаты получены для двух наиболее типичных представителей двух классов распределений, а именно для профилей NFW (с пиком в центре галактики) и Буркерта (плато).

Распространение фотонов высоких энергий: показано, что из-за взаимодействия фотонов с РМИ целесообразно учитывать только поток, идущий из Млечного Пути, и пренебречь всеми эффектами взаимодействия с межзвездной средой для фотонов с энергией  $E > 10^{18}$  эВ, что эквивалентно массам частиц  $X$  превосходящим  $10^{14}$  ГэВ.

Распространение нейтрино высоких энергий: оставаясь в пределах точности принятой для задачи вычисления потока частиц, достигающего Земли, считается поток нейтрино полностью перемешанным, т.е. соотношение  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau$  равно  $1 : 1 : 1$ . При вычислении нейтринного потока достигающего Земли необходимо учитывать инструментальные

эффекты детектора. Для протонов рассмотрено влияние магнитных полей на возможную анизотропию их потока.

## Глава 2.

На основе результатов Главы 1, обсуждается поиск космических фотонов с энергиями превышающими 100 ТэВ. Отмечается, что в настоящее время единственным доступным способом детектирования космических частиц с энергиями более 100 ТэВ является наблюдение широких атмосферных ливней (ШАЛ), порождаемых этими частицами в атмосфере Земли. До настоящего времени фотонов с энергией  $> 100$  ТэВ не было зарегистрировано ни в одном эксперименте. Экспериментальные верхние пределы на поток фотонов, падают с увеличением энергии медленнее чем измеренный полный поток космических лучей, следствием этого является бóльшая эффективность пределов на поток фотонов в области более высоких энергий в ограничении параметров темной материи. Сделано сопоставление фотонного сигнала от темной материи с массами  $10^7 - 10^{16}$  ГэВ с верхними пределами на диффузные потоки фотонов с энергиями выше 100 ТэВ. На основании этого получены наиболее сильные на сегодняшний день ограничения на время жизни тяжелой темной материи.  $M_{\chi} \sim 10^{12}$  ГэВ, для которых время жизни  $\sim 10^{22}$  лет

## Глава 3

Обсуждаются экспериментальные данные о потоке космических нейтрино с энергиями, превышающими 100 ТэВ в связи с недавним детектированием нейтринных событий с энергиями выше 100 ТэВ в эксперименте IceCube. Из-за относительно слабого взаимодействия нейтрино с веществом не все космические нейтрино порождают ШАЛ в атмосфере или дают сигнал в рабочем объеме нейтринных детекторов. Вследствие этого, экспозиция нейтринных экспериментов и нейтринная экспозиция экспериментов ШАЛ зависит не только от направления но и от энергии нейтрино. Это, в свою очередь, ведет к тому, что пределы на поток нейтрино, получаемые из одних и тех же экспериментальных данных, оказываются разными для разных предполагаемых спектров нейтрино. Величина, по которой делается сопоставление модели с экспериментом — это полное число нейтринных событий, которые будут зарегистрированы в данном эксперименте в предположении заданного нейтринного спектра.

Показано, что в целом фотонные пределы ограничивают время жизни темной материи с массами в интервале  $10^7 - 10^{16}$  ГэВ сильнее, чем нейтринные пределы, за исключением узкой области масс около значения  $E \sim 10^8$  ГэВ. Из этого следует, что нейтринный поток зарегистрированный экспериментом IceCube, вероятнее всего, не может быть объяснен адронным распадом тяжелой темной материи. Причина в том, что фотонные пределы ограничивают параметры темной материи сильнее, чем нейтринные, поскольку фотонные экспозиции установок ШАЛ существенно превосходят их нейтринные экспозиции, равно как и экспозиции нейтринных экспериментов, а также из-за наблюдения ненулевого потока нейтрино в противовес ненаблюдению фотонов соответствующих энергий.

Было указано, что в перспективе возможным тестом для различения потока нейтрино происходящего из распада темной материи от астрофизических и космогенных потоков является анализ анизотропии этого потока, а также отношения нейтринного потока к потенциально детектируемому фотонному потоку.

## Глава 4

В то время как в главах 2 и 3 рассматриваются возможные проявления сигнала от частиц темной материи в спектрах космических гамма-квантов и нейтрино высокой энергии, в главе 4 вместо протонного спектра рассматривается его угловая анизотропия для выделения сигнала от частиц темной материи без достаточно убедительного обоснования такого перехода. Утверждается, что необходимо принимать в расчет полный поток

космических лучей, что он доминирован изотропным потоком заряженных частиц, в том числе внегалактических космических лучей, тогда как возможный вклад от распада темной материи составляет незначительную анизотропную примесь.

Рассматривается роль анизотропии направлений прихода космических лучей в поиске сигнала распада тяжелой темной материи. При ультравысоких энергиях космических лучей исследование их анизотропии может помочь идентифицировать их источники, в частности проверить гипотезу об их корреляции с крупномасштабной структурой Вселенной.

Вызывает недоумение использование данных экспериментов EAS-TOP [8], IceCube [9]: с одной стороны, они в списке экспериментов, где получены верхние пределы на дипольную анизотропию, а с другой стороны, автор отмечает, что в работах EAS-TOP и IceCube достоверно зарегистрирована ненулевая анизотропия.

Представленные на ICRC2017 результаты совместной обработки данных с PAO и TA экспериментов о смешанном из разных ядер составе потоке космических лучей в области  $10^{18} - 10^{19}$  эВ свидетельствуют, по-видимому, не в пользу их происхождения от распадов частиц темной материи.

### **Заключение**

Из анализа современных данных о диффузном потоке космических фотонов получены наиболее сильные на сегодня ограничения на время жизни тяжелой темной материи, распадающейся в адроны. Предложено несколько способов уточнения результатов: путем рассмотрения неадронных каналов распада тяжелой темной материи; более точного учета эффектов распространения фотонов в межзвездной среде. Результаты Главы 1 могут быть обобщены путем анализа фотонного сигнала от выделенных направлений. Как правило, экспериментальные верхние пределы на поток частиц от выделенного направления оказываются строже, чем аналогичные пределы на диффузный поток.

Рассматриваются перспективы существующих и запланированных экспериментов по измерению потока фотонов и нейтрино, а также анизотропии космических лучей высоких энергий. В связи с вводом в строй новых экспериментов астрофизики частиц и планами усовершенствования действующих экспериментов, в ближайшее время возможен существенный прогресс в области непрямого поиска тяжелой темной материи.

### **Замечания.**

Неточное утверждение (Глава 1), что итоговый спектр каждого (конечного) продукта определяется первичным каналом распада. На самом деле заданный конечный продукт может появиться из нескольких первичных каналов и итоговый спектр определяется их относительным вкладом.

Недостатком используемого диссертантом аналитического подхода, основанного на формализме КХД (Глава 1), является невозможность вычисления вкладов прямых лептонных каналов распада частиц темной материи  $X$ .

В формулах (4.6) и (4.7) (Глава 4) для вычисления коэффициентов  $A_n$  и  $B_n$  перепутаны функции  $\sin$  и  $\cos$ .

Подпись к Рис.4.2 (Глава 4) занимает больше половины страницы, что многовато и затрудняет прочтение основного текста.

Имеется заметное количество опечаток и синтаксических ошибок.

Указанные замечания не влияют на основной вывод настоящего отзыва, диссертация выполнена на высоком теоретическом уровне, полученные результаты опубликованы в ведущих научных изданиях и доложены на авторитетных международных конференциях. Ее результаты будут использованы при анализе новых данных, которые будут получены на существующих и создаваемых установках по измерению КЛ в области сверхвысоких энергий. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы были доложены, обсуждены и одобрены на семинаре Лаборатории ядерных проблем Объединенного Института Ядерных Исследований 25 июля 2017 года.

Диссертация М.Ю.Кузнецова «Поиск тяжелой темной материи методами астрофизики частиц высоких энергий» соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика, а ее автор, Кузнецов Михаил Юрьевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил:

Руководитель сектора Научно-экспериментального отдела  
физики элементарных частиц Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного Института Ядерных Исследований,  
к. ф-м. наук

Л.Г.Ткачев

Подпись Л.Г.Ткачева удостоверяю.

Главный Ученый секретарь ОИЯИ,  
д.ф-м.н.

А.С.Сорин

Сведения о ведущей организации:  
Объединенный Институт Ядерных Исследований.  
Адрес. 141980, Московская область, г.Дубна, ул. Жолио-Кюри 6.

Объединенный Институт Ядерных Исследований.  
Адрес: 141980, Московская область, г.Дубна, ул. Жолио-Кюри 6.  
Тел.: +7 (49621) 6-50-59  
Электронный адрес администрации института: post@jinr.ru

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

1. Armengaud E.,..., V. Brudanin, D. Filosofov, S. Rozov, E. Yakushev et al. // *Constraints on low-mass WIMPs from the EDELWEISS-III dark matter search* // JCAP. 2016. Vol. 1605, no. 05. P. 019. arXiv:astro-ph.CO/1603.05120.
2. Agnes P.,..., K. Fomenko, D. Korablev, A. Sotnikov et al. // *The DarkSide project* // JINST. 2016. Vol. 11, no. 02. P. C02051.
3. Agnes P.,..., K. Fomenko, D. Korablev, A. Sotnikov et al. // *Direct Search for Dark Matter with DarkSide* // J. Phys. Conf. Ser. 2015. Vol. 650, no. 1. P. 012006.
4. Agnes P.,..., K. Fomenko, D. Korablev, A. Sotnikov, A. Vishneva et al. // *Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search* // Phys. Rev. 2016. Vol. D93, no. 8. P. 081101. [Addendum: Phys. Rev.D95,no.6,069901(2017)]. arXiv:astro-ph.CO/1510.00702.
5. Fiziev P. // *Dark Energy and Dark Matter in Stars Physic* // PoS. 2016. Vol. FFP14. P. 080. arXiv:gr-qc/1411.0242.
6. Belanger G., Boudjema F., Pukhov A., Semenov A. // *micrOMEGAs4.1: two dark matter candidates* // Comput. Phys. Commun. 2015. Vol. 192. P. 322–329. arXiv:hep-ph/1407.6129.
7. Alexander T.,..., D. Korablev, A. Sotnikov et al. // *DarkSide search for dark matter* // JINST. 2013. Vol. 8. P. C11021.
8. Atkin E.,..., N. Gorbunov, V. Grebenyuk, S. Porokhovoy, A. Tkachenko, L. Tkachev et al. // *First results of the cosmic ray NUCLEON experiment* // JCAP. 2017. Vol. 1707, no. 07. P. 020. arXiv:astro-ph.HE/1702.02352.
9. Atkin E.,..., N. Gorbunov, V. Grebenyuk, S. Porokhovoy, A. Tkachenko, L. Tkachev et al. // *The NUCLEON space experiment for direct high energy cosmic rays investigation in TeV–PeV energy range* // Nucl. Instrum. Meth. 2015. Vol. A770. P. 189–196.
10. Atkin E.,..., N. Gorbunov, V. Grebenyuk, S. Porokhovoy, A. Tkachenko, L. Tkachev et al. // *The NUCLEON experiment. Results of the first year of data acquisition* // Astropart. Phys. 2017. Vol. 90. P. 69–74.
11. Abgrall N.,..., V. Brudanin, M. Shirchenko, S. Vasilyev, E. Yakushev, I. Zhitnikov et al. // *New limits on Bosonic Dark Matter, Solar Axions, Pauli Exclusion Principle Violation, and Electron Decay from the Majorana Demonstrator* // Phys. Rev. Lett. 2017. Vol. 118, no. 16. P. 161801. arXiv:nucl-ex/1612.00886.
12. Beskidt C., de Boer W., Kazakov D. I., Wayand S. // *Perspectives of direct Detection of supersymmetric Dark Matter in the NMSSM* // Phys. Lett. 2017. Vol. B771. P. 611–618. arXiv:hep-ph/1703.01255.