

**ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук Суворовой Ольги Васильевны на тему
«Исследование потоков нейтрино астрофизической природы в
экспериментах первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD»
по специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий»,**

Прошедшие 10-15 лет ознаменовались бурным развитием нейтринной астрономии. В первую очередь, это было связано с вводом в строй и успешной работой крупных установок, таких как IceCube, ANTARES. Важнейшим достижением телескопа IceCube стало обнаружение астрофизической компоненты в диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий от десятков ТэВ до ПэВ. Отрадно отметить, что в одном ряду с указанными выше инструментами находится и отечественный нейтринный телескоп Baikal-GVD, строительство которого началось в 2016 году. Уже на стадии развертывания в период 2018-2022 гг (т.е. до выхода на полную мощность, которое ожидается в 2027-2028 гг) телескоп позволил получить результаты, подтверждающие наличие астрофизической компоненты нейтрино с энергиями выше десятков ТэВ, а также указания на вероятные источники их происхождения, такие как блазары и микроквазары. Обнаружение и уверенная регистрация астрофизических нейтрино высоких энергий чрезвычайно важны не только для астрофизики, но для фундаментальной физики в целом, так как они могут дать ключ к пониманию происхождения космических лучей и гамма-лучей сверхвысоких энергий, нерешенных вопросов космологии, объяснению природы темной материи, помочь ответить на вопросы о существовании новых частиц, взаимодействий, фундаментальных симметрий при самых высоких энергиях.

Таким образом, тема диссертации, **безусловно, является актуальной.**

Необходимо отметить, что актуальность тематики диссертации обуславливает и громадное количество исследований и публикаций, связанных с ее темой. Однако, несмотря на достигнутый прогресс, остается значительное количество нерешенных проблем в рассматриваемой области.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, четырех приложений и списка литературы. Объем диссертации составляет 278 страниц и включает 79 рисунков, 9 таблиц, а также список литературы из 324 наименований.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, представлена информация методах проведенного исследования, приведены основные результаты, выносимые на защиту, обоснована их научная новизна, практическая значимость, достоверность, а также указаны сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В первой главе достаточно подробно описаны современные экспериментальные и теоретические представления об источниках и компонентах потоков нейтрино в высокоэнергичной области спектра, в частности, рассмотрены процессы генерации, как атмосферных нейтрино, так и каналы генерации и процессы ускорения нейтрино в астрофизических источниках. Кроме того, приведены методы моделирования прохождения нейтрино сквозь Землю и в байкальской воде, а также распространение нейтрино внутри Солнца. Результатом главы является расчеты сечений взаимодействия нейтрино для солнечного вещества, алгоритмы прохождения нейтрино в Солнце и Земле, расчет эффективной площади телескопа Baikal-GVD для разных ароматов нейтрино, которые используются в следующих главах диссертации.

Вторая глава посвящена анализу экспериментальных данных телескопа Baikal-GVD и измерению диффузного потока нейтрино высоких энергий по

выделенным каскадам. В ней приводится описание принципа и метода глубоководного детектирования нейтрино высоких энергий, описание структуры телескопа Baikal-GVD, моделированию отклика оптических модулей на черенковское излучение от ливней, критерии отбора нейтринных событий, выделение ливней, их последующий анализ, а также поиск ассоциации выделенных нейтринных событий с астрофизическими источниками. В результате проведенного анализа за период 2018-2022 гг было выделено 25 каскадных событий-кандидатов на нейтрино астрофизического происхождения. Показано, что среди этих событий примерно половина имеет высокую вероятность такого происхождения, а примерно четверть попадает в область галактической плоскости. Последнее может указывать на то, что по крайней мере часть из зарегистрированных нейтрино связана с активностью галактических источников.

В третьей главе описаны реализованные процедуры автоматического слежения и формирования онлайн оповещений о нейтринных событиях высоких энергий на основе быстрой обработки данных телескопа Baikal-GVD. Также на телескопе был впервые реализован режим онлайн-анализа и слежения внешних алертов на регулярной основе. Это позволило включить российский инструмент в международную сеть многоволновых (multi-messenger) наблюдений, что позволяет российскому инструменту на мировом уровне участвовать в поиске, регистрации и исследованиях наиболее интересных транзиентных событий во Вселенной.

Четвертая глава посвящена поиску возможного сигнала от холодной темной материи в измеренных потоках мюонных нейтрино на Байкальском глубоководном телескопе NT200. На основе данных этого телескопа были получены верхние пределы на поток нейтрино от Солнца, центра Галактики, Большого Магелланова Облака и еще более 20 темных карликовых галактик, который может образоваться от аннигиляции массивных слабо взаимодействующих частиц темной материи. Важно подчеркнуть, что

полученные результаты включены в ежегодный обзор Particle Data Group, что свидетельствует об их мировом уровне.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты диссертации являются оригинальными, их научная новизна определяется, в том числе, использованием уникальных наблюдательных данных, полученных на Байкальском нейтринном телескопе Baikal-GVD и Байкальском глубоководном телескопе NT200. Выносимые на защиту положения хорошо обоснованы, значимы для нейтринной астрономии, их достоверность подтверждается результатами моделирований, сравнений полученных автором результатов с результатами других экспериментов, таких как ANTARES, IceCube. Результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах и конференциях высокого уровня (российских и международных), семинарах научных групп разных нейтринных экспериментов (как российских, так и зарубежных), опубликованы в 25 печатных работах в рецензируемых изданиях. Важно отметить, что все разработанные автором диссертации алгоритмы анализа данных применимы к увеличивающемуся объему телескопа Baikal-GVD и новым физическим задачам.

У оппонента есть несколько замечаний и вопросов к диссертации:

1) В главе 1 приведены расчеты, связанные с прохождением нейтрино через Землю, а также их распространением в веществе Солнца. Эти вопросы уже неоднократно рассматривались ранее другими авторами, ссылки на работы которых приведены в диссертации. В чем новизна и отличие от ранее сделанных расчетов и выводов?

2) На рис.2.2 и его описании на стр. 70-71 отличаются обозначения для длины рассеяния и ее величины (в тексте от 15 до 70 м, на рисунке 55-80 м).

3) Для подавления фоновых событий используется ограничение $Q > 1.5$ ф.э., что позволяет их подавить примерно на порядок. После этого

применяются дополнительные критерии отбора. Каково в целом отношение полезного сигнала и фоновой засветки? Каким образом был выбран указанный выше порог и достаточно ли его для подавления фона?

4) В главе 2, на стр. 103-104 показано, что значимость превышения измеренного числа событий на фоне невелика 2.4σ , при этом погрешность потока прямого канала не учитывалась. Вопросы – почему? как ее учет повлияет на указанную выше значимость?

5) На рис. 2.29 карты нарисованы в разных проекциях, что затрудняет их сравнение.

6) Представляется чрезвычайно интересным детектирование триплета событий в галактической плоскости, из области неба вблизи источников LSI +61 303 или SwiftJ0243, однако каких-то выводов о возможной связи обнаруженных событий с этими объектами в диссертации не сделано. Было бы желательно дать более подробные оценки и пояснения по этому вопросу.

7) В главе 4, в части обсуждения доказательств существования темной материи по наблюдению столкновения скоплений галактик не совсем корректно описан сам эффект и указанный год его обнаружения: оригинальные статьи Маркевича и др. и Клоува и др. вышли в 2004 году, последующая работа Клоува и др. в 2006 году, сами наблюдения проводились в 2000 (Чандра) и 2004 (телескоп им. Хаббла) гг. Ссылки на эти работы в тексте отсутствуют.

8) Теория существования так называемых «темных звезд», излучение которых может объясняться аннигиляцией темной материи, достаточно спорная, как и возможность накопления и последующая аннигиляция ВИМПов внутри Солнца. Тем не менее, ввиду отсутствия однозначных наблюдательных подтверждений природы темной материи, исследование и получение оценок на любые экзотические формы ТМ важны для понимания ее сущности. В этом смысле, результаты главы 4 представляют научный интерес. Вопрос: почему для такого анализа были использованы данные

телескопа HT200, а не более современного и чувствительного Baikal-GVD, для которого приведена только ожидаемая чувствительность?

9) Диссертация в целом написана хорошим языком. Тем не менее, в ней присутствует некоторое количество опечаток, встречаются трудночитаемые сложноподчиненные предложения на несколько строчек (например, стр. 39), присутствуют жаргонизмы или прямая калька с английского языка, например, «живое время наблюдений», «бинарная система», «галактический кластер», в ряде случаев ссылки на работы некорректно обозначены значками «??» или «Ref» (например, на стр. 69, 155, 228).

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертационная работа полностью отвечает требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а Ольга Васильевна Суворова, безусловно, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН
заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований РАН» (ИКИ РАН), заведующий отделом астрофизики высоких энергий,
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований РАН» (ИКИ РАН)

Лутовинов Александр Анатольевич

29.10.2024

Контактные данные:

тел.: +7(495)3332222, e-mail: aal@iki.rssi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Адрес места работы:

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН
Тел.: +74953332588; e-mail: iki@cosmos.ru

Подпись сотрудника Института космических
исследований РАН Лутовинова А.А. удостоверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН

А.М.Садовский

29.10.2024

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Plavin A.V., Burenin R.A., Kovalev Y.Y., Lutovinov A.A., Starobinsky A.A., Troitsky S.V., Zakharov E.I. «Hard X-ray emission from blazars associated with high-energy neutrinos» // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2024 – 05 – 133, DOI: [10.1088/1475-7516/2024/05/133](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/05/133)
2. Semena A., Mereminskiy I., Lutovinov A., et al. «SRG/ART-XC Galactic Bulge deep survey. II. Catalogue of point sources» // MNRAS, 2024 – 529 – 941-952, DOI: [10.1093/mnras/stae189](https://doi.org/10.1093/mnras/stae189)
3. E. I. Zakharov, V. V. Barinov, R. A. Burenin, A. A. Lutovinov, et al. «All-sky limits on sterile neutrino galactic dark matter obtained with SRG/ART-XC after two years of operations» // Physical Review D, 2024 – 109 – L021301, DOI: 10.1103/PhysRevD.109.L021301
4. Doroshenko Victor, Poutanen Juri, Heyl Jeremy, Lutovinov Alexander, et al. «Complex variations of X-ray polarization in the X-ray pulsar LS V +44 17/RX J0440.9+443» // Astron. Astrophys., 2023 – 677 – A57, DOI: [10.1051/0004-6361/202347088](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347088).
5. Frederiks D., Svinkin D., Lysenko A. L., ... Lutovinov A. A., et al. «Properties of the Extremely Energetic GRB 221009A from Konus-WIND and SRG/ART-XC Observations» // Astrophysical Journal Letters, 2023 – 949 – L7, DOI: [10.3847/2041-8213/acd1eb](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acd1eb)
6. A. A. Lutovinov, S. S. Tsygankov, I. A. Mereminskiy, et al. «SRG/ART-XC discovery of SRGA J204318.2+443815: towards the complete population of faint X-ray pulsars» // Astron. Astrophys., 2022 – 661 – A28, DOI: [10.1051/0004-6361/202141630](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141630).
7. Mereminskiy I. A., Lutovinov A. A., Postnov K. A., et al. «Search for Pre-Burst Emission from Binary Neutron Star Mergers with Spectrum-Roentgen-Gamma» // Astronomy Letters, 2022 – 48 – 370-375, DOI: [10.1134/S1063773722070064](https://doi.org/10.1134/S1063773722070064)
8. Lutovinov A., Suleimanov V., Manuel Luna G. J., al. «INTEGRAL View on cataclysmic variables and symbiotic binaries» // New Astron. Rev., 2020 – 91 – 101547, DOI: 10.1016/j.newar.2020.101547.