

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01  
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от **14.11.2024** г. № **19/12**

О присуждении **Суворовой Ольге Васильевне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «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, - принята к защите 20 июня 2024 года протокол № 16/9 диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства образования и науки России № 75/нк от 15 февраля 2013 года.

Соискатель Суворова Ольга Васильевна, 1958 года рождения, защитила диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук по теме “Поиск сигнала от холодной темной материи в нейтринном эксперименте на Баксанском подземном сцинтилляционном телескоп” в 1997 году в диссертационном совете, созданном на базе ИЯИ РАН. В настоящее время О.В. Суворова работает в должности старшего научного сотрудника в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук, в Лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий.

Официальные оппоненты:

**Быков Андрей Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики, руководитель Отделения.

**Лутовинов Александр Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, заместитель директора.

**Дворников Максим Сергеевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), теоретический отдел, и. о. заведующего отделом, ведущий научный сотрудник.

- дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" (НИЦ "Курчатовский институт") в своем положительном заключении, подписанном Блинниковым Сергеем Ивановичем (доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт») и Юдиным Андреем Викторовичем (кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории физики плазмы и астрофизики НИЦ «Курчатовский институт») и утвержденном первым заместителем Центра по науке Дьяковой Юлией Алексеевной, доктором физико-математических наук, указала, что работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор Суворова Ольга Васильевна заслуживает присуждения ей учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15 - Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Соискатель имеет 114 цитируемых работ, в том числе 25 работ по теме диссертации, опубликованных в российских и зарубежных журналах в период с 1996 по 2023 гг., из них 17 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Список работ по теме диссертации:

1. Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий./Ж.-А.М. Джилкибаев, Г.В. Домогацкий, О.В. Суворова. //Успехи физических наук. -2015. –Т. 85. –В. 5. –С. 531-539.
2. Природные потоки нейтрино и скрытая масса Вселенной/ О.В. Суворова // Ядерная Физика. -2011. –Т. 74. –В. 1. –С. 1-9.
3. Слежение за высокоэнергичными нейтрино на Байкальском нейтринном телескопе Baikal-GVD/ А.В. Аврорин, ..., О.В. Суворова и др. //Письма в Астрономический журнал, -2021. -Т. 47. –В. 2. –С. 114-124.
4. Neutral current interactions of high energy neutrinos with matter of the Sun and Earth/E.V. Bugaev, S.P.Mikheyev, O.V. Suvorova. // Nuova Cim. C. - 1996, -С. 623-804.
5. Глубоководный черенковский детектор в озере Байкал/ А.В. Аврорин, ..., О.В. Суворова и др. // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. -2022. –Т. 161. –В. 4. –С. 476-496. // Deep-Underwater Cherenkov Detector in Lake Baikal // J.Exp.Theor.Phys. 134 (2022) 4, 399-416.
6. Baikal-GVD: first cluster Dubna/ O.V. Suvorova, A.D. Avrorin, ... et al. // PoS EPS-HEP2015 (2015) 418.
7. Baikal-GVD: first results and prospects/ A.D. Avrorin,, ..., O.V. Suvorova, et al. // EPJ Web Conf. 209, 01015 (2019).
8. Calibrating the Measuring Channels of the Baikal-GVD Neutrino Telescope/ A.D. Avrorin, ..., O.V. Suvorova, et al. // Instrum.Exp.Tech. – 2020. –Т. 63. –В. 4., -С. 551-560.
9. The Baikal-GVD neutrino telescope: search for high-energy cascades/ V.A. Allakhverdyan, ..., O.V.Suvorova, et al.// PoS ICRC2021 (2021) 1144.

10. Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope/ V.A. Allakhverdyan, ..., O.V.Suvorova, et al. // *Physical Review D*. -2023. –T. 107. –C. 042005.
11. High-energy neutrino-induced cascade from the direction of the flaring radio blazar TXS 0506+056 observed by Baikal-GVD in 2021/ V.A. Allakhverdyan, ..., O.V.Suvorova, et al. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* -2023. -T. 527. -B. 3. -C. 8784-8792.
12. Search for directional associations between Baikal Gigaton Volume Detector neutrino-induced cascades and high-energy astrophysical sources/ V.A. Allakhverdyan, ..., O.V.Suvorova, et al. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* -2023. -T. 526. -B. 1. -C. 942-951.
13. Multi-messenger and real-time astrophysics with the Baikal-GVD telescope/ O.V.Suvorova, V.A. Allakhverdyan, et al. // *PoS ICRC2021 (2021) 946*, DOI: 10.22323/1.395.0946.
14. Search for High energy Neutrinos from GW170817 with the Baikal-GVD Neutrino Telescope/ A.D. Avrorin , ..., O.V. Suvorova, et al. // *JETP Lett.* -2018. –T. 108. -B. 12. –C. 787-790.
15. The Baikal-GVD telescope follow up analysis of the IceCube alerts/ V.Dik, O.V.Suvorova, ... et al. // *PoS ECRS2022 (2022) 096*.
16. Baikal-GVD Astrophysical Neutrino Candidate near the Blazar TXS 0506+056/ V.M. Aynutdinov, ..., O.V. Suvorova, et al.// *PoS ICRC2023 (2023) 1457*.
17. Status of indirect dark matter search with neutrino telescopes/ O. V. Suvorova// *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. -2016. -Т.47. -В. 6, -С.938-946.
18. Indirect method of cold dark matter seach/ O. Suvorova // *DARK2000*, 1st ed. 2001 Edition by H.V. Klapdor-Kleingrothaus, ISBN 3-540-41797-4 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; ISBN-10: 3642626084, ISBN-13 : 978-3642626081, Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 2001 edition (October 3, 2013), <https://inspirehep.net/literature/542489>.
19. Status and perspectives of indirect search for dark matter/ O. V. Suvorova// *Beyond the dissert: Accelerator, non-accelerator and space approaches into the next millennium. Proc., 2nd International Conference Physics Beyond the Standartd Model, Ringberg Castle, Tegernsee, Germany, June 6-12, 1999*, 853-867.

20. Ограничения на сечения упругого рассеяния нейтралино на нуклоне в нейтринном эксперименте на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе/ Суворова О.В., Болиев М.М., Демидов С.В., Михеев С.П. // Ядерная физика. – 2013. – Т. 76, № 11. – С. 1433–1442; //Upper limit on the cross section for elastic neutralino-nucleon scattering in a neutrino experiment at the Baksan Underground Scintillator Telescope // Phys.Atom.Nucl. -2013. -Т.76. - С. 1367-1376.
21. Neutrino physics with the Baksan Underground Scintillation Telescope/M.M. Boliev, C.V. Demidov, O.V. Suvorova // Nuovo Cimento C. -2014. -Т.37. –В. 03. -С. 193-195.
22. Search for neutrino emission from relic dark matter in the Sun with the Baikal NT200 detector/A. D. Avrorin , ..., O.V. Suvorova, et al. // Astroparticle Physics. -2015. -Т. 62. –С. 12-20.
23. A search for neutrino signal from dark matter annihilation in the center of the Milky Way with Baikal NT200/A.D. Avrorin, ..., O.V. Suvorova, et al.// Astroparticle Physics. -2016 -Т. 81 –С. 12-20.
24. Sensitivity of the Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of the galactic dark matter halo/ A.D. Avrorin, ..., O.V. Suvorova, et al.// Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters -2015. -Т. 101. -В. 5, -С. 289-294.
25. Dark matter constraints from an observation of dSphs and the LMC with the Baikal NT200/ A.D. Avrorin, ..., O.V. Suvorova, et al. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. -2017. –Т. 125. -В. 1. -С. 80-90, Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. -2017. –Т. 152. –В.1. –С. 97-109. e-Print: arXiv:1612.03836 [astro-ph.HE].

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что работа представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, и полностью отвечает всем требованиям к докторским диссертациям, предъявляемым Положением о

порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

Отмечены следующие критические замечания:

- Диссертация в целом написана хорошим языком, ясно и грамотно, с небольшим количеством орфографических и грамматических ошибок и сбоев в формулах. Так, на стр. 37 обрезан знак корня, на стр. 55 – сбой скобок в формуле (1.15) и в (1.16), формула (4.22) вылезает за края страницы. 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).
- Значительная часть рисунков приведена в очень маленьком, трудном для чтения формате, их ширина меньше трети страницы. Часть рисунков (например, Рис.1) содержат и русские, и английские подписи. Желательно было бы соблюдать единообразие. В тексте присутствует очень частый типографский сбой (например, на стр. 9, 35, 39, 59 и т.д.): лишний пробел после запятой, отделяющей разряды в написании чисел. Например, вместо 2,6 написано 2, 6, что затрудняет чтение.
- Понятие «эксперименты первой очереди» используется даже в названии диссертационной работы, однако в тексте нигде не поясняется, что под этим подразумевается в данном конкретном случае.
- В тексте часто смешиваются два разных подхода к определению степени спектра: так, на стр. 37 говорится: «приводит к падающему спектру  $E^{\{-\text{гамма}\}}$ », а в следующем же предложении « $\text{гамма}=-2$ ». На стр. 39 опять упоминается фактор « $\text{гамма}=-2$ ». На стр. 107 сначала пишется  $\text{gamma\_astro}=2.58$ , а парой строк ниже «полученном значении показателя спектра  $-2,58$ ». В подписи к рис. 2.23 опять  $-2.58$ , а на рис. 2.24 приведены данные для положительного  $\text{гамма}$ , хотя на той же стр. 109 ниже упоминается значение  $-2.58$ .

- На стр. 44 говорится про иерархию масс нейтрино: «нормальную (где  $\nu_e$  легче  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$ ) и обратную». Говорить про массы чистых флейворов ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ ) неправильно: они являются смесью массовых состояний. Вопрос иерархии заключается в том, является ли одно из этих массовых состояний ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ) значительно легче или значительно тяжелее двух других, массы которых близки.
- В тексте (см. подпись к рис. 1.2, а также на стр. 55, на стр. 62) упоминается термин «изоскалярная мишень», но нигде не поясняется, то это такое.
- На стр. 55 в формуле (1.15) в первом члене справа, пропущен множитель в знаменателе – плотность ( $\rho$ ).
- В тексте встречаются «пустые» ссылки [?] или «Ref» (например, на стр. 69, 155, 228).
- В формуле (2.5) используется параметр  $dt=20$  нс, однако выбор именно этого значения, а также вопрос, зачем в принципе требуется введение этой величины, никак не объясняются.
- На стр. 161 при анализе формулы (4.4) утверждается, что «в условиях равновесия скорость аннигиляции по величине равна половине скорости захвата». На стр. 178 в формуле (4.11) и в тексте после опять утверждается, что в равновесии «скорость захвата равна удвоенной скорости аннигиляции». При первом чтении это вызывает недоумение. Читателю приходится приложить значительные усилия, чтобы сообразить, что в гравитационном захвате участвует одна частица, а при аннигиляции уничтожается две. При достижении баланса между этими процессами и появляется коэффициент 2. Этот момент можно было бы раскрыть полнее.
- В начале раздела 4.2 (стр. 181) утверждается, что «радиус балджа Галактики порядка 8 кпс». Балдж Млечного Пути как минимум в несколько раз меньше, а 8 кпс – это расстояние от Солнца до центра Галактики.
- При описании формулы (4.16) для профиля темной материи разделение между случаем с каспом и ядром проводится по значению  $\gamma=1$ . Непонятно, чем вызвано внимание именно к этому значению? Плотность

становится сингулярной при  $\gamma > 0$ . С другой стороны, масса остаётся конечной вплоть до значения  $\gamma = 3$ .

- Общее замечание по главе 3, в которой подробно описан процесс регистрации нейтрино от блазаров и слияния нейтронных звезд, в том, что недостаточно четко описан конкретный вклад соискателя в полученные результаты.
- Автором использован модельный профиль распределения плотности темной материи, обобщающий широко известный профиль NFW (Наварро-Френка и Уайта 1996), а также модели гало Moore и др. (1999) и Burkert (1996). Ранее аналогичный анализ профиля плотности темного вещества делался в сравнении с профилем сильного избытка излучения в аннигиляционной линии 511 кэВ, наблюдаемого из центральной области Галактики (см. Рис. 21 из статьи REVIEWS OF MODERN PHYSICS, том 83, стр. 1001, 2011. The 511 keV emission from positron annihilation in the Galaxy). Возможно, также имеет смысл выполнить поиск корреляции мюонных нейтрино с распределением аннигиляционного излучения, которое, при определенных условиях, может трассировать продукты распада темного вещества.
- Важным результатом работы, заслуженно вынесенном в основные положения, является оценка дифференциального спектра 11 восходящих ливневых событий с равновесным 1:1:1 нейтрино. В положениях приведено только значение показателя степени спектра -2.58. По мнению оппонента здесь следовало привести аппроксимацию потока с ошибками определения параметров.
- 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?
- 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).
- 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?

- В главе 2, на стр. 103-104 показано, что значимость превышения измеренного числа событий над фоном невелика  $2.4\sigma$ , при этом погрешность потока прямого канала не учитывалась. Вопросы – почему? как ее учет повлияет на указанную выше значимость?
- На рис. 2.29 карты нарисованы в разных проекциях, что затрудняет их сравнение.
- 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.
- 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.
- Теория существования так называемых «темных звезд», излучение которых может объясняться аннигиляцией темной материи, достаточно спорная, как и возможность накопления и последующая аннигиляция частиц темной материи 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?

В ходе обсуждения указанных замечаний соискатель дала необходимые разъяснения и согласилась с допущенными опечатками.

В отзывах указано, что вышеперечисленные замечания не имеют принципиального характера и не снижают высокой общей оценки результатов автора диссертации. Во всех отзывах сделан вывод о том, что диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а её автор Ольга Васильевна Суворова заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией ученых по сходной тематике.

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований:**

- Разработана методика выделения событий от ливней высоких энергий в экспериментальных данных Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD.
- Выполнен анализ данных, измеренных за период с апреля 2018 года по март 2022 года, и выделено 25 ливневых событий-кандидатов на астрофизические нейтрино с направлениями по всей небесной сфере.
- Из результатов анализа энергетического и углового распределения 11 восходящих ливневых событий сделан вывод о существовании диффузного потока нейтрино астрофизической природы на уровне достоверности 99,76%.
- Определен показатель степенного энергетического спектра диффузного потока нейтрино с равновесным 1:1:1 отношением ароматов нейтрино из анализа параметров 11 восходящих ливневых событий методом функции максимального правдоподобия и с учетом систематических ошибок. Полученное значение показателя  $-2,58_{+0.27-0.33}$  согласуется с данными IceCube в пределах стандартного отклонения.
- Выявлены два выделенных направления в распределении 25 нейтринных событий на небесной сфере. Вычислены вероятность астрофизической

природы восходящего события с энергией выше 200 ТэВ из направления в окрестности радио блазара TXS-0506+056 и вероятность случайного совпадения нейтринных событий в триplete из окрестности микроквазара LSI +061 303.

- Разработана и реализована процедура формирования онлайн оповещений Baikal-GVD о нейтринных событиях высоких энергий с информацией о времени, направлении, энергии, вероятности соответствия фону по статистике Пуассона и сигналности по степенному спектру сигнала  $E^{-2}$ .
- Разработана и реализована процедура автоматического слежения за нейтринными алертами телескопа ANTARES и телескопа IceCube на основе быстрой обработки данных Baikal-GVD с минимальной задержкой 3 мин во временных окнах  $\pm 500$  сек,  $\pm 1$ ч,  $\pm 12$ ч,  $\pm 1$  день. Выполнен анализ данных Baikal-GVD по поиску событий ассоциируемых с алертами телескопов ANTARES и IceCube. В отсутствии корреляций каскадов с алертами по направлению и времени в интервале времени  $\pm 12$  часов получены оценки чувствительности телескопа Baikal-GVD в композиции 7 кластеров к потоку нейтрино от источников Северного неба на уровне  $1,1\text{--}2,5$  ГэВ/см<sup>2</sup> для спектра нейтрино  $E^{-2}$  в диапазоне энергий нейтрино от 1 ТэВ до 10 ПэВ.
- Обнаружено совпадение в пределах углового разрешения направления прихода нейтринного события Baikal-GVD с энергией 43 ТэВ с направлением на радио блазар PKS 0735+178 в период активности источника в электромагнитном спектре и через 4 часа после оповещения о нейтрино IC211208A. Вычисленны значимости совпадения.
- Получены ограничения на 90% доверительном уровне на плотность потока нейтрино в интервале энергий от  $10^3$  ГэВ до  $10^8$  ГэВ с показателем спектра -2 от источника в галактике NGC4993 в двух режимах наблюдения двух кластеров Baikal-GVD сезона 2017 года: в интервале  $\pm 500$  секунд относительно времени гравитационного события GW170817 и времени послесвечения в течение 14 суток после вспышки, соответственно, как  $5,2 \times (E/\text{ГэВ})^{-2} \text{ГэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$  и  $9 \times (E/\text{ГэВ})^{-2} \text{ГэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ .

- Установлены экспериментальные ограничения сверху на 90% доверительном уровне методами функции максимального правдоподобия на сечения упругого рассеяния частиц темной материи на нуклонах в Солнце и на сечения их аннигиляции в наблюдении направлений потенциально ярких астрофизических объектов скопления неизлучающего вещества таких как Центр Галактики, галактика Большое Магелланово Облако и темные сфероидальные галактики по данным телескопа NT200.

Оценка достоверности результатов выявила, что:

- Обоснованность полученных результатов в моделировании отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде следует из тестирования эффективности алгоритма восстановления координат и энергии ливня от излучения искусственных источников света, глубоководных лазеров и светодиодных матриц.
- Расчеты сечений нейтрино в реакциях рассеяния на нуклонах и численное моделирование прохождения нейтрино в веществе сравнивалось с расчетами в аналогичных работах в публикациях, включая диссертационные работы на байкальском телескопе NT200.
- В расчетах по теме поиска сигнала темной материи использовались авторские материалы кандидатской диссертации, которые были апробированы с экспериментальными данными подземного телескопа БПСТ и в оценках чувствительности для глубоководного телескопа ANTARES, а также в низкофоновом эксперименте ULTIMA.
- Все полученные результаты с верхними ограничениями на сечения рассеяния частиц темной материи на протонах и на частоту их аннигиляции в астрофизических объектах по данным Байкальского глубоководного NT200 включены в обзоры достижений в физике частиц и фундаментальных взаимодействий Particle Data Group (PDG) в разделе WIMP and Dark Matter Searches.
- По теме обмена оповещениями в многоволновом поиске сигнала внешние алерты от ANTARES принимались онлайн непосредственно от триггерной системы этого телескопа.

- При регистрации совпадения с алертом от IceCube IC211208A и с активностью блазара PKS 0735+178 от Baikal-GVD было отправлено оповещение в Atel (The Astromer's telegram).

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что создана база данных нейтринных событий с энергией выше 60 ТэВ по всему небу и выше 15 ТэВ с восходящими направлениями; по выделенным на Baikal-GVD восходящим ливневым событиям показано, что на уровне значимости три сигма в диффузном потоке нейтрино присутствует высокоэнергичная астрофизическая компонента, впервые подтверждающая результаты телескопа IceCube, и был вычислен её спектральный индекс по модели равновесного потока нейтрино с одностепенным спектром. В исследовании получены первые указания на наличие галактической компоненты в потоке астрофизических нейтрино и на возможную кластеризацию нескольких событий в окрестности направления на микроквazar LSI +061 303; зарегистрировано нейтринное событие с вероятностью выше 97% астрофизического происхождения и с энергией выше 200 ТэВ в окрестности радиоблазара TXS 0506 +056; были решены важные задачи, связанные с формированием оповещений об астрофизических нейтринных событиях, выделенных по специальным критериям отбора, и отслеживание внешних оповещений, благодаря чему впервые источником нейтрино рассматривается радиоблазар PKS 0735+178. Исследование также помогает расширить понимание фундаментальных вопросов физики, таких как природа темной материи и процессы за пределами Стандартной модели, что важно для современной астрофизики и физики элементарных частиц. Все разработанные в диссертации алгоритмы анализа данных применимы к увеличивающемуся объему телескопа и к новым физическим задачам, включающим мультиканальные исследования в режиме реального времени. Разработанные диссертантом методики и полученные результаты могут найти дальнейшее применение в исследованиях, выполняемых в ИЯИ РАН, ФИАН, МИФИ, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, ИКИ РАН и других научных центрах.**

**Личный вклад соискателя состоит** в анализе данных, полученных на первых восьми кластерах нейтринного телескопа Baikal-GVD и нейтринного телескопа NT200. Полученные результаты представлены в виде статей и докладов на семинарах и конференциях. Во всех выносимых на защиту результатах личный вклад диссертанта является определяющим. В численном методе анализа выделенных ливневых событий автором получены значения показателя одностепенного энергетического спектра диффузного потока нейтрино и контура ошибок с учетом систематики. Диссертант выполнил научное руководство исследованиями первых данных телескопа Baikal-GVD сезона 2018-2021 гг и подготовку к защите диссертационной работы на степень кандидата физико-математических наук аспиранта ИЯИ РАН, результаты которой частично вошли в данную работу. Диссертант является основным автором по анализу внешних алертов и по классификации оповещений Baikal-GVD на астрофизические события-кандидаты. В статистическом анализе ливневых событий на Baikal-GVD и мюонных нейтрино в полном наборе данных NT200 диссертантом применены методы функции максимального правдоподобия бинового и небинового вычисления значимости и тест-статистики, а также метод бутстрэппинга и псевдо-экспериментальных наборов данных в поиске превышения числа событий на фоне. Диссертантом сделаны расчеты сечений нейтрино в реакциях рассеяния на нуклонах и сечений аннигиляции и упругого рассеяния на нуклоне гипотетических частиц темной материи (массивных слабодействующих). В решении прохождения нейтрино в веществе с энергией ГэВ-ТэВ диссертантом учитывались вторичные нейтрино в нейтральных токах и были вычислены совместно с соавторами эффекты осцилляции нейтрино и регенерации тау-нейтрино. Совместно с соавторами диссертантом получены верхние пределы на плотность потока нейтрино в направлении галактики NGC4993 в гравитационном событии GW170817A, в направлении не идентифицированных источников нейтрино в алертных событиях от нейтринного телескопа IceCube и верхние ограничения на сечения аннигиляции и рассеяния частиц темной материи в предполагаемых источниках их наибольшего скопления.

На заседании 14 ноября 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Суворовой Ольге Васильевне ученую степень доктора физико-математических наук за важный вклад в развитие экспериментальных методов исследования высокоэнергичных процессов, происходящих во Вселенной: решение важных задач, связанных с обнаружением астрофизической компоненты в диффузном потоке нейтрино и с формированием оповещений об астрофизических нейтринных событиях, и полученные результаты, расширяющие понимание фундаментальных вопросов физики, таких как природа темной материи и процессы за пределами Стандартной модели, что важно для современной астрофизики и физики элементарных частиц.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **20** человек, из них **6** докторов наук по специальности 1.3.15 - Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, участвовавших в заседании, из **27** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту - **0** человек, проголосовали: за – **20**, против – **0**.

Председатель  
диссертационного совета 24.1.163.01  
доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_ Кравчук Л.В.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.163.01  
кандидат физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_ Демидов С.В.

14.11. 2024 г.

м.п.