

«УТВЕРЖДАЮ»  
Первый заместитель директора  
Центра по науке  
ДЬЯКОВА Ю.А.

« 28 » октября 2024 года

### **ОТЗЫВ**

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

#### **Актуальность темы диссертации**

Актуальность исследования потока нейтрино астрофизической природы на глубоководном телескопе Baikal-GVD не подлежит сомнению: только эксперимент может установить источники и физические процессы, ответственные за ускорение космических частиц до высоких и сверхвысоких энергий. Астрофизические нейтрино таких энергий также чувствительны к физике за рамками Стандартной Модели и являются ключом к пониманию происхождения космических лучей и излучения самых высоких энергий. Кроме того, они могут пролить свет на многолетнюю астрофизическую загадку Темной Материи.

Другим важнейшим аспектом, определяющим несомненную актуальность работы, является современное развитие многоканальной всеволновой астрономии (multimessenger astronomy). В её рамках решающим является взаимодействие установок разных типов (оптических, радио, рентгеновских и гамма-телескопов, нейтринных детекторов и гравитационно-волновых антенн) в режиме реального времени. Эксперимент Baikal-GVD является значимой частью этой сети: на нём поиск источников ведется, в том числе, и в режиме обмена оповещениями (алертами) о регистрации активности различных астрофизических объектов с другими участниками.

Научная новизна данной диссертации заключается в следующем: впервые создана база данных ливневых событий на Baikal-GVD. Впервые получено подтверждение обнаруженной ранее телескопом IceCube астрофизической компоненты. Впервые вычислен показатель одностепенного спектра нейтрино в диффузном потоке. Впервые Baikal-GVD указал на идентификацию астрофизических нейтрино. Впервые сформирован формат для вывода нейтринных алертов Baikal-GVD в режиме реального времени. Впервые Baikal-GVD в режиме онлайн принимал и анализировал алерты от

нейтринного телескопа ANTARES. Впервые в рамках участия в международной программе мульти-мессенджер проводился корреляционный анализ данных Baikal-GVD с нейтринными алертами от IceCube и другим оповещениям. Впервые получены ограничения сверху на плотность потока нейтрино в направлении потенциальных источников по внешним нейтринным алертам. Впервые в режиме реального времени зарегистрировано совпадение направлений нейтринного события с внешним алертом от IceCube. Впервые получено ограничение сверху на плотность потока нейтрино от галактики NGC4993 в гравитационном событии GW170817. Впервые выполнено моделирование отклика телескопа NT-200 на сигнал от источников аннигиляции гипотетических частиц темной материи. Впервые по данным нейтринного телескопа NT200 с пороговой энергией 10 ГэВ получены ограничения сверху на сечения самоаннигиляции частиц темной материи в их источниках: в центре Галактики, в 22 карликовых сфероидальных темных галактиках и галактике Большое Магелланово облако.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений. Полный объем диссертации составляет 278 страниц, включая 79 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 324 наименований.

**В первой главе** приведены современные экспериментальные и теоретические представления о компонентах и источниках измеряемых потоков нейтрино. Описаны методы моделирования прохождения нейтрино в толще Земли, в воде озера Байкал и в Солнце. Приведены основные процессы генерации атмосферных нейтрино, каналы генерации и процессы ускорения нейтрино в потенциальных астрофизических источниках. Описаны основные реакции взаимодействия нейтрино (антинейтрино) с веществом при энергиях больше нескольких ГэВ.

Здесь же были рассчитаны эффективные площади регистрации ливней, инициированных взаимодействием нейтрино в воде, в зависимости от энергии нейтрино для трех ароматов. В моделировании прохождения нейтрино в веществе Солнца учитывались осцилляции трех ароматов и их вторичные взаимодействия.

**Во второй главе** проведен анализ данных Baikal-GVD по результатам, полученным за время его развертывания в сезоны 2018 - 2021 гг для потока нейтрино в области энергий ТэВ - ПэВ. Описан метод глубоководного детектирования нейтрино высоких энергий, приведены основные оптические параметры среды, определяющие распространение черенковского излучения мюонов и ливней. Описан алгоритм, используемый в моделировании черенковского излучения ливней высоких энергий для анализа данных Baikal-GVD.

Приведено описание структуры нейтринного телескопа Baikal-GVD и его модульной структуры из кластеров оптических модулей. Дано описание отдельного кластера, состоящего из восьми трехсекционных гирлянд с числом оптических модулей 288.

Приведены результаты моделирования отклика оптического модуля на черенковское излучение от ливня, что необходимо для вычисления вероятности его срабатывания в кластере при восстановлении параметров каскадов, инициированных нейтрино. Описана методика розыгрыша Монте-Карло в моделировании распространения света в прозрачной среде. Рассчитаны области чувствительности оптического модуля к черенковскому излучению ливней в зависимости от их энергии.

Описан триггерный отбор событий, выделение ливней и критерии отбора нейтринных событий. Дан алгоритм реконструкции параметров ливней, который основан на анализе времени и заряда импульсов сработавших модулей, с использованием их координат, приведены условия подавления шумовых импульсов.

Приведен анализ выделенных ливней высоких энергий с апреля 2018 года по март 2022 года: всего было выделено 135 событий с энергией, большей 40 ТэВ и числом сработавших модулей больше 19. Из них 16 выделенных событий с энергией выше 60 ТэВ и 13 событий с энергией выше 100 ТэВ. Доля астрофизических нейтрино от диффузного потока оценивается как 7.8 событий. Приведены распределения по энергии и косинусу зенитного угла выделенных 16 событий в сравнении с распределением от ожидаемых атмосферных мюонов и нейтрино, а также астрофизических нейтрино диффузного потока, а также приведены оценки величины систематических ошибок.

Представлен метод численной подгонки в определении параметров модели равновесного диффузного потока астрофизических нейтрино, предполагающий равное количество нейтрино и антинейтрино и равных ароматов нейтрино на уровне Земли. Вывод параметров потока астрофизических нейтрино получен по данным Baikal-GVD впервые и является первым подтверждением на уровне три сигма результатов нейтринного эксперимента IceCube об астрофизической компоненте в потоке нейтрино высоких энергий.

Осуществлен поиск ассоциации выделенных 25 нейтринных событий с астрофизическими источниками, подробно обсуждаются ассоциации для трех каскадов Baikal-GVD: GVD190216CA (398 ТэВ), GVD190604CA (129 ТэВ) и GVD2107161CA (110 ТэВ).

**В третьей главе** представлены реализованные процедуры автоматического слежения. Они основаны на быстрой обработке данных Baikal-GVD и формировании онлайн-оповещений (алертов) о нейтринных событиях высоких энергий.

Проведен поиск корреляции событий Baikal-GVD с нейтринными алертами действующих телескопов, ANTARES и IceCube. Описано единственное на сегодняшний день совпадение нейтринных событий высокой энергии, наблюдаемых двумя телескопами в один день и в одном направлении в пределах точности измерений, зарегистрированное 8 декабря 2021 года. В результате полученных совпадений отслеживание нейтринных алертов от радиоблазара PKS 0735+178 в настоящее время относится к приоритетному в поиске потенциальных мультиволновых источников.

Также описан другой выделенный алерт: высокоэнергичное каскадное событие GVD210418CA с энергией ливня 224 ТэВ и с числом сработавших модулей 24, зарегистрированное на Baikal-GVD 18 апреля 2021 года.

Представлен результат поиска и ограничения на потоки нейтрино от известного гравитационно-волнового сигнала GW170817 и сопутствующего гамма-всплеска GRB170817A. Полученный на Baikal-GVD в составе двух кластеров результат поиска нейтрино, впервые показал его уровень чувствительности и потенциал в поиске источников гравитационного сигнала от двойных систем.

**В четвертой главе** представлены результаты анализа по поиску сигнала от темной материи в измеренных потоках мюонных нейтрино на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе NT200 и оценки чувствительности для проекта Baikal-GVD.

По данным Байкальского глубоководного нейтринного телескопа NT200 за время его функционирования с апреля 1998 по февраль 2003, были получены верхние ограничения на поток нейтрино высоких энергий в направлении на Солнце, от центра Галактики, от 22-х темных карликовых галактик в видимости телескопа и от галактики Большое Магелланово Облако.

Из ограничений на поток нейтрино были выведены верхние пределы на сечения упругого рассеяния WIMP на нуклонах и на сечения аннигиляции для разных каналов аннигиляции частиц темной материи массой в интервале от 30ТэВ до 10ТэВ. Из полученных по экспериментальным данным ограничений на поток нейтрино от Солнца выводятся ограничения на сечения упругого рассеяния WIMP на нуклонах.

В задаче определения величины сигнала от центра Галактики было показано влияние астрофизической неопределенности на верхние пределы сечения аннигиляции темной материи. Наиболее строгие ограничения на сечения аннигиляции получены для центра Галактики, для комбинированного анализа карликовых галактик и для галактики Большое Магелланово Облако. Полученные верхние ограничения на сечения рассеяния WIMP на нуклонах, на сечения аннигиляции WIMP по нейтринным событиям NT200 включены в ежегодный обзор Particle Data Group о достижениях в физике частиц и фундаментальных взаимодействиях.

**В заключении** приведены результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем:

1. На основе анализа данных телескопа Baikal-GVD были выделены первые кандидаты на астрофизические нейтрино в событиях с энергией выше 60 ТэВ для нисходящих ливней и выше 15 ТэВ для восходящих.
2. Было показано, что на уровне три сигма в диффузном потоке нейтрино по выделенным на Baikal-GVD ливневым событиям присутствует высокоэнергичная астрофизическая компонента, что подтверждает результаты IceCube.
3. По выделенным на Baikal-GVD ливневым событиям выполнена численная подгонка измеренного потока нейтрино и впервые

определены величина показателя одностепенного спектра и значение нормировки потока на каждый аромат с учетом систематических ошибок измерения.

4. Впервые получены указания на корреляцию с идентифицированными источниками: каскадное событие из нижней полусферы с энергией выше 200 ТэВ вблизи радио блазара TXS 0506+056 и кластеризация трех нисходящих ливней по направлению галактического микроквазара LSI 061+303.
5. Были определены критерии отбора, включающие оценки статистической значимости при автоматическом формировании собственных нейтринных оповещений Baikal-GVD.
6. В задаче автоматического приема оповещений о сигнале астофизического происхождения были внедрены триггерные программы приема нейтринного алерта от телескопа ANTARES.
7. В режиме реального времени зарегистрировано совпадение направлений нейтринного события с внешним алертом от IceCube с направлением на радио блазар PKS 0735+178 в период его активности.
8. Впервые на Baikal-GVD получены ограничения сверху на плотность потока нейтрино в направлении нейтринных алертов по триггерам нейтринных телескопов ANTARES и IceCube.
9. Впервые получено ограничение сверху на плотность потока нейтрино от галактики NGC4993 в гравитационном событии GW170817, которому сопутствовал гамма-всплеск GRB170817A.
10. Впервые выполнено моделирование отклика телескопа NT-200 на сигнал от источников аннигиляции частиц темной материи WIMP в Солнце и получены ограничения сверху на сечения их упругого рассеяния на нуклоне.
11. Впервые по данным нейтринного телескопа NT200 получены ограничения сверху на сечения аннигиляции WIMP в потенциально ярких их источниках: в центре Галактики, в 22 карликовых сфероидальных темных галактиках и галактике Большое Магелланово Облако.

**Достоверность** изложенных в работе результатов гарантируется тестированием отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде по искусственным источникам света, с глубоководными лазерами и светодиодными матрицами. Расчеты сечений нейтрино и численное моделирование прохождения нейтрино в веществе сравнивалось с расчетами в аналогичных работах. Расчёты по поиску сигнала от WIMP тестировались по экспериментальным данным БПСТ, ANTARES и эксперимента ULTIMA. На Baikal-GVD в режиме реального времени зарегистрировано совпадение направлений нейтринного события с внешним алертом от IceCube в установленном временном окне 12 часов и с направлением на радио блазар PKS 0735+178 в период его активности в электромагнитном спектре, что

является независимым подтверждением абсолютной достоверности работы установки.

**Практическая значимость** диссертации заключается в том, что все разработки диссертанта использовались и используются в настоящее время на Baikal-GVD, а также применимы к увеличивающемуся объему телескопа и к новым физическим задачам. К практически важным достижениям следует отнести измерение диффузного потока нейтрино и обнаружение в нем астрофизической компоненты, эффективный алгоритм реконструкции ливневых событий и полученные указания на совпадения нейтрино с радио блазарами. Полученные ограничения на сечения аннигиляции WIMP в направлении потенциально ярких источников вошли в обзоры достижений в физике частиц и фундаментальных взаимодействий Particle Data Group в разделе «WIMP and Dark Matter Searches».

### Замечания по работе

1. Значительная часть рисунков приведена в очень маленьком, трудном для чтения формате, их ширина меньше трети страницы.

2. Часть рисунков (например, Рис.1) содержат и русские, и английские подписи. Желательно было бы соблюдать единообразие.

3. 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.

4. Понятие «эксперименты первой очереди» используется даже в названии диссертационной работы, однако в тексте нигде не поясняется, что под этим подразумевается в данном конкретном случае.

5. Диссертация написана ясно и грамотно, с небольшим количеством орфографических и грамматических ошибок (электро-магнитном, Энштейн, пяти-мерный) 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.

6. В тексте часто смешиваются два разных подхода к определению степени спектра: так, на стр. 37 говорится: «приводит к падающему спектру  $E^{-\gamma}$ », а в следующем же предложении « $\gamma=-2$ ». На стр. 39 опять упоминается фактор « $\gamma=-2$ ». На стр. 107 сначала пишется  $\gamma_{astro}=2.58$ , 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  $\gamma$ , хотя на той же стр. 109 ниже упоминается значение  $-2.58$ .

7. 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.

8. 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.

9. На стр. 55 в формуле (1.15) в первом члене справа, пропущен множитель в знаменателе – плотность ( $\rho$ ).

10. В тексте встречаются «пустые» ссылки [?] (например, на стр. 69, стр. 155).

11. 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.

12. 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.

13. Рис. 4.12 остался без подписи и без комментария в тексте. Для рис. 4.16 в подписи есть описание только правой панели (хотя описание левой есть в тексте).

14. 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.

15. 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  $\gamma=3$ .

## **Заключение**

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Диссертационная работа Суворовой О.В. является законченным научным исследованием и полностью соответствует специальности 1.3.15. - Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий. Рассмотренная диссертация показывает, что её автор в совершенстве владеет современными аналитическими, численными и экспериментальными методами исследований. Данная диссертация вносит важный вклад в развитие экспериментальных методов исследования высокоэнергичных процессов во Вселенной. Эксперимент Baikal-GVD, в разработке и осуществлении которого диссертант внес существенный вклад, является уникальным и передовым не только в российской, но и в мировой науке и, можно надеяться, еще принесет огромное количество уникальной информации об устройстве нашего мира.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 25 печатных изданиях, из них 17 печатных работ изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьи за авторством одного диссертанта. Эти результаты были доложены на 27 российских и международных конференциях в виде приглашенных, пленарных и стендовых докладов.

Диссертация полностью соответствует паспорту специальности 1.3.15.

Результаты диссертации Суворовой О.В. были заслушаны на Тематическом семинаре ККТЭФ (НИЦ «Курчатовский институт») «Экспериментальная физика высоких энергий, физика ускорителей заряженных частиц и физико-химические исследования материалов», протокол №9 от 10 октября 2024 г. Отзыв обсуждён и одобрен на заседании Лаборатории Физики Плазмы и Астрофизики НИЦ «КИ» - ККТЭФ.

Диссертация Суворовой Ольги Васильевны «Исследование потоков нейтрино астрофизической природы в экспериментах первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD» удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15. - Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

**Отзыв составили:**

Главный научный сотрудник лаборатории физики плазмы и астрофизики НИЦ «Курчатовский институт», доктор физико-математических наук  
Блинников Сергей Иванович

Начальник лаборатории физики плазмы и астрофизики НИЦ «Курчатовский институт», кандидат физико-математических наук  
Юдин Андрей Викторович

Подписи А.В. Юдина и С.И. Блинникова заверяю:  
Главный учёный секретарь НИЦ «Курчатовский институт»  
Борисов Кирилл Евгеньевич

Почтовый адрес:  
123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Телефон: +7 (499) 196–95–39 Факс: +7 (499) 196–17–04  
Электронная почта: [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A.A. Dzhioev, A.V. Yudin, N.V. Dunina-Barkovskaya, A.I. Vdovin, «Neutrinos from pre-supernova in the framework of TQRPA method», *MNRAS* 527, 7701-7712 (2024), DOI: 10.1093/mnras/stad3730.
2. A.V. Yudin, N.V. Dunina-Barkovskaya, S.I. Blinnikov, «Thermal Neutrinos from the Explosion of a Minimum-Mass Neutron Star», *Astronomy Letters*, 2022, Vol. 48, No. 9, pp. 497-502, DOI: 10.1134/S1063773722090067.
3. S. Blinnikov, D. Nadyozhin, N. Kramarev, A. Yudin, «Neutron Star Mergers and Gamma-Ray Bursts: Stripping Model», *Astronomy Reports*, 2021, Vol. 65, No. 5, pp. 385-391, DOI: 10.1134/S1063772921050012.
4. A.A. Dzhioev, A.V. Yudin, N.V. Dunina-Barkovskaya, A.I. Vdovin «Neutrino Spectrum and Energy Loss Rates Due to Weak Processes on Hot 56Fe in Pre-Supernova Environment» *Particles* 2023, 6(3), 682-692, DOI: 10.3390/particles6030041
5. I.V. Panov, A.V. Yudin, «Production of Heavy Elements during the Explosion of a Low-Mass Neutron Star in a Close Binary», *Astron.Lett.* 46 (2020) 8, 518-527, DOI: 10.1134/S1063773720080034.