

ОТЗЫВ

официального оппонента Быкова А. М.
на диссертацию Суворовой Ольги Васильевны
«Исследование потоков нейтрино астрофизической природы
в экспериментах первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD»,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий

Первые прямые детектирования астрофизических нейтрино высоких энергий несомненно относятся к числу самых важных результатов, полученных в астрофизике за последнее десятилетие. Нейтринные обсерватории гигатонного класса, среди которых крупнейшими являются IceCube и Baikal-GVD, открыли новые возможности для исследования фундаментальных физических проблем. Астрофизические нейтрино, наблюдаемые этими обсерваториями, имеют энергии много выше, чем изучаемые в реакторных и ускорительных экспериментах, что позволяет проверку гипотез в рамках Стандартной модели и за ее пределами в области энергий выше десятков ТэВ. Статистически значимое отождествление части наблюдаемых нейтринных событий с популяцией космологически удаленных активных ядер галактик - блазарами. Это позволяет получить уникальную информацию о процессах ускорения частиц в узких релятивистских джетах, сформированных аккрецией на сверхмассивные черные дыры. Поиск источников космических лучей с энергиями выше ПэВ (10^{15} эВ) в Галактике остается важной нерешенной проблемой физики космических лучей, в решении которой ключевое значение имеет исследование галактической компоненты в наблюдаемых потоках высокоэнергичных нейтрино. Модели коллапса ядер массивных звезд предсказывают возможность ускорения частиц до высоких энергий магнетаром или джетом черной дыры внутри оболочки непрозрачной для гамма излучения. Нейтринная астрономия позволяет поиск таких источников, наряду с оценками потоков от источников коротких и длинных гамма-всплесков. Фундаментальный интерес представляет поиск средствами нейтринной астрономии частиц - кандидатов на роль темной материи. Существенное число ограничений на модель холодной темной материи из слабовазаимодействующих массивных частиц оставляет тем не менее интересные возможности для поиска продуктов аннигиляции массивных частиц нейтринными телескопами. Решение перечисленных выше и многих других **актуальных проблем** зависит от успешной работы и развития нейтринной обсерватории Baikal-GVD, чему посвящена диссертация О.В. Суворовой. Работа продолжает традиции исследований физики и астрофизики нейтрино, в которых признанную в мире, очень большую роль многие годы играет школа Института ядерных исследований РАН.

Успешное детектирование нейтринных событий телескопом Baikal-GVD требует разработки большого числа моделей и алгоритмов. Автором диссертации получен **ряд новых важных результатов**. Выполнено моделирование взаимодействия нейтрино и антинейтрино с веществом для детектора NT200 и большого телескопа Baikal-GVD, что необходимо для определения эффективной площади регистрации трех ароматов нейтрино. Решены важные задачи определения критериев отбора событий на основе оценки статистической значимости для формирования систем автоматического

оповещения. Также, построены триггерные системы приема сигналов оповещения от нейтринного телескопа ANTARES и международной сети астрономических сигналов GCN. Это позволило, в частности, зарегистрировать в режиме реального времени совпадение направления нейтринного события телескопа с внешним сигналом оповещения от обсерватории IceCube, с вероятным направлением на блазар PKS 0735+178.

Наряду с разработкой существенных элементов систем детектирования нейтринных телескопов NT200 и Baikal-GVD в диссертации О.В. Суворовой выполнены интересные оригинальные исследования. Среди событий, зарегистрированных телескопом Baikal-GVD на уровне достоверности 99,76% выявлено наличие диффузного потока астрофизических нейтрино из 11 восходящих ливневых событий. Показано, что дифференциальный спектр этих событий может быть описан степенным законом с показателем -2.58 , что согласуется в пределах ошибок с результатом обсерватории Ice Cube.

Диссертация объемом 278 страниц, включает четыре главы основного текста, введение, заключение, 4 приложения, 79 рисунков, 9 таблиц и список литературы (324 наименования). Она представляет собой **законченное оригинальное научное исследование**, посвященное измерению потоков астрофизических нейтрино в области энергий ТэВ-ПэВ с помощью глубоководного телескопа Baikal-GVD.

Во *Введении* автор даёт краткий обзор основных этапов развития нейтринной астрономии, обосновывает актуальность поставленных задач и целей диссертации. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 О.В.Суворова приводит современные экспериментальные данные и теоретические представления о компонентах и источниках детектируемых потоков нейтрино в области энергий ТэВ-ПэВ. Также автор подробно описывает методы моделирования физических процессов, связанных с прохождением нейтрино через толщу Земли и байкальскую воду, а также через Солнце в решении задач по поиску сигнала от частиц темной материи. В результате моделирования процессов распространения нейтрино в Земле в взаимодействия в чувствительном объеме телескопа были рассчитаны эффективные площади регистрации ливней, инициированных взаимодействием нейтрино в воде, в зависимости от энергии нейтрино для трех ароматов. Показано, что влияние осцилляции и регенерации нейтрино во вторичных взаимодействиях на величину потока мюонных нейтрино на уровне Земли зависит от начального спектра в центре Солнца.

Глава 2 посвящена анализу данных Baikal-GVD, первым результатам, полученным за время его развертывания в 2018-2021 гг. и исследования диффузного потока нейтрино в области энергий ТэВ-ПэВ. В разделе 2.1 автор детально описывает метод глубоководного детектирования нейтрино высоких энергий, который заключается в регистрации оптического излучения Вавилова-Черенкова. Эффективность этого метода в характерных особенностях развития процесса черенковского излучения заряженных частиц, которая зависит от гидрооптических свойств среды постановки эксперимента. В разделе 2.2 приводится описание кластерной структуры нейтринного

телескопа Baikal-GVD. Раздел 2.3 посвящен моделированию отклика оптических модулей (ОМ) телескопа на черенковское излучение от ливня, необходимого для вычисления вероятности срабатывания ОМ в кластере при восстановлении параметров каскадов, инициированных нейтрино. В моделировании отклика ОМ на черенковское излучение ливней учитывается спектральная чувствительность ОМ в совокупности с результатами измерения зависимости отклика ОМ от угла падения света относительно оси ФЭУ, а также дополнительное ослабление светового потока в стекле сферического корпуса оптического модуля. В этом же разделе приведены вычисленные области чувствительности ОМ к черенковскому излучению ливней в зависимости от их энергии в системе координат ОМ. В разделе 2.4 описываются триггерный отбор событий, выделение ливней и критерии отбора нейтринных событий. В экспериментальном поиске событий от нейтрино высоких энергий по регистрации ливней на телескопе Baikal-GVD использовался многолетний опыт исследований на Байкальском телескопе NT200. Выбор критериев выделения каскадных событий высоких энергий в их реконструкции на одном кластере Baikal-GVD сформировался по результатам анализа симулированных событий, инициированных потоком атмосферных мюонов. В результате, за период наблюдений с марта 2018 по февраль 2022 гг. с направлениями по всему небу выделены первые 25 каскадных событий-кандидатов на нейтрино астрофизического происхождения. В разделе 2.5 детально описывается анализ 135 выделенных ливней высоких энергий. В подразделе 2.5.1 Вывод параметров диффузного потока астрофизических нейтрино в результате реконструкции и выделения ливней высоких энергий с восходящими направлениями, 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. Наконец, в разделе 2.6 представлен поиск ассоциации выделенных 25 нейтринных событий с астрофизическими источниками.

В Главе 3 представлены реализованные процедуры автоматического слежения на основе быстрой обработки данных Baikal-GVD и формирования онлайн оповещений (алертов) о нейтринных событиях высоких энергий. Обмен алертами дает возможность идентифицировать источник одновременно в разных каналах излучения, включая нейтрино, гамма-излучение и гравитационные волны, при отслеживании направления во временном окне ожидаемого сигнала от доли секунд до часов или дней в зависимости от модели предполагаемого процесса. Большой интерес представляет поиск корреляции событий (таких как возможные сигналы от блазаров PKS 0735+178 и TXS 0506+056) Baikal-GVD с нейтринными оповещениями от действующих телескопов ANTARES и IceCube в реальном времени на регулярной основе. Полученный на Baikal-GVD в составе двух кластеров результат поиска нейтрино, ассоциированных с гравитационно-волновым событием GW170817, впервые показал его уровень чувствительности и потенциал в поиске источников гравитационного сигнала от двойных систем компактных объектов. В данной главе также получены ограничения сверху на плотность потока нейтрино в направлении, полученном из нейтринных оповещений по триггерам нейтринных телескопов ANTARES и IceCube.

В Главе 4 представлены результаты анализа по поиску сигнала от холодной темной материи в измеренных потоках мюонных нейтрино на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе NT200, с низким по энергии порогом регистрации 10 ГэВ и оценки чувствительности для проекта Baikal-GVD. В частности, (1) выполнено моделирование отклика телескопа NT200 на сигнал от источников аннигиляции гипотетических массивных слабодействующих частиц темной материи в Солнце и получены ограничения сверху на 90% д.у. на сечения упругого рассеяния массивных частиц темной материи на нуклоне; (2) по данным нейтринного телескопа NT200 получены ограничения сверху на 90% д.у. на сечения аннигиляции массивных частиц темной материи в потенциально ярких их источниках: в центре Галактики, в 22 карликовых сфероидальных темных галактиках и галактике Большое Магелланово Облако.

В Заключении автором сформулированы основные результаты диссертации, а в Приложении описаны: Сечения взаимодействия нейтрино в рамках электрослабой теории, использованные в моделировании отклика нейтринных детекторов. Аппроксимации моделей развития ливней. Код приема оповещения от телескопа ANTARES. Скорости захвата Солнцем частиц темной материи.

Резюмируя результаты автора отмечу еще раз, что в диссертации решены важные задачи, связанные с формированием оповещений об астрофизических нейтринных событиях, выделенных по специальным критериям отбора, и отслеживания внешних оповещений. Все разработанные в диссертации алгоритмы анализа данных применимы к увеличивающемуся объему телескопа и к новым физическим задачам, включающим мультисканальные исследования в режиме реального времени. В работе рассчитаны потоки нейтрино в области энергий ГэВ-ТэВ в направлении потенциально ярких источников аннигиляции или распада частиц темной материи. Главной особенностью работы, обуславливающей ее **новизну и значимость**, является вклад автора в развитие новейшего нейтринного телескопа Baikal-GVD (в т.ч. NT200), на этапе его развертывания в 2018-2021 гг., и его использование для поиска сигнала от предполагаемых источников темной материи. Актуальность диссертационной работы заключается в исследовании высокоэнергетических нейтрино астрофизического происхождения, которые могут раскрыть происхождение и механизмы ускорения космических частиц до экстремально высоких энергий. Высокоэнергичные астрофизические нейтрино, регистрируемые расположенным в озере Байкал глубоководным телескопом Baikal-GVD, обеспечивают возможность поиска и анализа источников этих частиц, включая недоступные для традиционного электромагнитного наблюдения "темные" ускорители космических лучей высоких энергий. 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. Отдельный интерес представляет полученные указания на наличие галактической компоненты в потоке астрофизических нейтрино и возможную кластеризацию нескольких событий в

окрестности направления на микроквазар LSI +061 303, что иллюстрирует Рис. 2.29 диссертации.

Достоверность и надёжность результатов диссертационной работы подтверждаются использованием адекватных математических методов, а также согласованностью полученных данных с результатами других научных групп. Результаты диссертации прошли проверку на многочисленных международных и всероссийских конференциях и были опубликованы в 25 статьях, 17 из которых находятся в Перечне ВАК ведущих рецензируемых журналов и изданий.

В качестве замечаний и пожеланий можно выделить следующие:

1. Один из существенных результатов автора диссертации связан с поиском возможных сигналов от аннигиляции частиц темной материи посредством детектирования потоков мюонных нейтрино с низким порогом регистрации порядка 10 ГэВ на телескопе Байкальском глубоководном телескопе НТ200. Для этого 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.
2. 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.

Следует подчеркнуть, что вышеперечисленные замечания не имеют принципиального характера и не снижают высокой общей оценки результатов автора диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация представляет собой законченное оригинальное научное исследование, вносящее существенный вклад в решение фундаментальной физической проблемы детектирования, изучения происхождения и поиска источников астрофизических нейтрино высоких энергий.

Результаты, полученные в диссертационной работе О.В. Суворовой, могут быть использованы в научных учреждениях, в которых ведутся работы по астрофизике

высоких энергий: ИКИ РАН, ИЯИ, ФТИ им. Иоффе РАН, ФИАН им П.Н.Лебедева, ИЗМИРАН, ИТЭФ, МГУ им. М.В.Ломоносова, АКЦ ФИАН, СПбГУ и др.

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

Руководитель отделения физики плазмы, атомной физики
и астрофизики ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе,
доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корр. РАН

Быков А.М

Подпись Быкова А.М. заверяю,
ученый секретарь ФГБУН ФТИ им. А.Ф.Иоффе
доктор физ.-мат. наук, профессор

Патров М.И.

28.10.2024

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

1. БЫКОВ А.М. «High-Energy Particles and Radiation in Star-Forming Regions» , A.M. Bykov, A. Marcowith, E. Amato, M.E. Kalyashova, J.M.D. Kruijssen, E. Waxman. Space Science Reviews, Volume 216, Issue 3, article id.42 (2020), DOI 10.1007/s11214-020-00663-0.
2. БЫКОВ А.М. «A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst», A. Ridnaia, D. Svinkin, D. Frederiks, A.Bykov et al., Nature Astronomy, Volume 5, p. 372-377 (2021), DOI: 10.1038/s41550-020-01265-0.
3. БЫКОВ А.М. «Photon and Neutrino Flares from Galactic Gamma-Ray Binaries», A.M. Bykov, A.E. Petrov, M.E. Kalyashova, S.V. Troitsky. The Astrophysical Journal Letters, Volume 921, Issue 1, article id. L10, 5 pp. (2021), DOI: 10.3847/2041-8213/ac2f3d.
4. БЫКОВ А.М. «Acceleration of Cosmic Rays to Energies above 10^{15} eV by Trans relativistic Shocks». A. M. Bykov, S.M. Osipov, V.I. Romanskii. J.Exp.Theor.Phys. 134 (2022) 4, 487-497.
5. БЫКОВ А.М. «X-ray emission from Westerlund 2 detected by SRG/ART-XC and Chandra: search for radiation of TeV leptons». A. M. Bykov, Yu. A. Uvarov, M. E. Kalyashova, D. V. Badmaev, I.Yu. Lapshov, A. A. Lutovinov, I. A. Mereminskiy, A. N. Semena. MNRAS 525 (2023) 1553-1561, DOI: 10.1093/mnras/stad2356.