

АННОТАЦИЯ РАБОТ,

ВЫПОЛНЕННЫХ ПО

государственному контракту № П 1242 от 27 августа 2009 г

по проблеме: «Поиск и исследование галактических и внегалактических источников нейтрино, космических лучей высоких энергий и гамма-всплесков»

по направлению «Астрономия, астрофизика и исследования космического пространства»

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет»
(ФГБОУ ВПО «ИГУ»)

664003, Иркутск, ул. К. Маркса, д.1.

Последние десятилетия ознаменованы огромным успехом в понимании строения и эволюции Вселенной, структуры материи и взаимодействий элементарных частиц. Тем не менее, сохраняется ряд нерешенных проблем фундаментального характера: не ясна природа темной материи и темной энергии, источников гамма-всплесков, барионной асимметрии и т.д. Уникальные природные условия Байкальской Сибири позволили развернуть здесь крупнейшие исследовательские проекты в области астрофизики. На озере Байкал создан первый в мире глубоководный нейтринный телескоп НТ200, начаты работы по проектированию и строительству Нейтринного телескопа НТ1000 с объемом кубический километр. На астрофизическом полигоне ГОУ ВПО «ИГУ» в Тункинской долине в 2009 году введен в строй крупнейший в мире черенковский детектор широких атмосферных ливней Тунка-133 площадью квадратный километр. Здесь же в 2010 году установлен сдвоенный робот-телескоп МАСТЕР II, предназначенный для наблюдения оптических транзиентов, в том числе: оптического сопровождения гамма-всплесков, поиска сверхновых звезд, комет, астероидов и других объектов.

Исследования, проводимые в рамках Байкальского нейтринного проекта, с помощью установки ТУНКА-133 и робот-телескопа МАСТЕР II, – крупнейших современных российских установок, позволяют получать результаты мирового уровня в области нейтринной астрофизики, физики космических лучей, физики высоких энергий, и наук о Земле, успешно конкурируя с зарубежными исследованиями и существенно дополняя их. Выполнение данного проекта стало важным вкладом в эти исследования. За прошедшие три года удалось значительно расширить круг проводимых работ и ускорить выполнение амбициозных планов по развитию комплекса уникальных астрофизических установок в Прибайкалье. В значительной степени это обусловлено тем, что выполнение проекта позволило привлечь и закрепить в науке 12 молодых специалистов, в работе также участвовало более 40 студентов Иркутского государственного университета.

Признанием успехов в реализации данного проекта можно считать возросший интерес ряда научных центров и университетов, международных коллабораций к

исследованиям в области Astroparticle Physics, ведущимся на озере Байкал и в Тункинской долине. В частности, Karlsruhe Institute of Technology, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY Institute for Experimental Physics of the University of Hamburg, Karlsruhe University, Karlsruhe приняли решение о проведении совместных исследований в области физики космических лучей и гамма - астрономии на базе Астрофизического полигона ФГБОУ ВПО «ИГУ» в Тункинской долине.

Методы регистрации черенковского и радиоизлучения ШАЛ, восстановления параметров событий, аппаратное и программное обеспечение для черенковских и радио детекторов ШАЛ, разработанные в рамках проекта, найдут широкое применение в крупнейших мировых экспериментах. Созданные, отработанные и прокалиброванные на Астрофизическом полигоне ФГБОУ ВПО «ИГУ» в Тункинской долине как в образцовом метрологическом центре детекторы будут использоваться в экспериментах: LHAASO, СТА, “AugerNEXT”, HiSCORE и тем самым Иркутский государственный университет станет участником этих крупнейших проектов.

В рамках данного проекта в Иркутском государственном университете в сотрудничестве с Институтом ядерных исследований РАН, Объединенным институтом ядерных исследований (г. Дубна) и другими организациями участниками сотрудничества БАЙКАЛ разработан проект нейтринного телескопа NT1000 кубокилометрового масштаба на оз. Байкал, созданы и испытаны в натуральных условиях важнейшие узлы и системы будущей установки, последовательно установлены экспериментальная гирлянда и прототип кластера NT1000.

Нейтринный телескоп NT1000 на оз. Байкал нацелен на решение широкого круга задач астрофизики, космологии и физики элементарных частиц - поиска локальных нейтринных источников, исследования диффузного потока нейтрино, поиска проявлений темной материи, поиска магнитных монополей и других экзотических частиц. Концептуально NT1000 будет представлять собой пространственную решетку оптических модулей на глубине 800-1300 м в объеме порядка 1 кубического километра, и будет иметь гибкую модульную структуру, формируемую из функционально независимых кластеров вертикальных гирлянд оптических модулей общим числом 2000-2500 ОМ. Модульная структура телескопа при необходимости даст возможность практически неограниченного увеличения его объема, а также позволит в случае возникновения новых приоритетных направлений исследований адаптировать его конфигурацию к изменившимся требованиям. С учетом оптических свойств и уровня собственного свечения водной среды оз. Байкал, рассматриваемая конфигурация телескопа обеспечит высокую эффективность регистрации мюонов (>10 ТэВ) и ливней (>100 ТэВ) высоких энергий, генерируемых при

взаимодействии нейтрино с веществом. Эффективная площадь телескопа для регистрации мюонных нейтрино в диапазоне энергий $10^{13} - 10^{18}$ эВ составит $(0.1-1) \text{ км}^2$ при угловом разрешении $(0.5-1)$ градуса. Это позволит за один год набора данных достичь уровня чувствительности к сигналу порядка $E^2F \sim (2-4) \times 10^{-12} \text{ ТэВ см}^2 \text{ с}^{-1}$ в задаче поиска локальных источников, что более чем на порядок превосходит чувствительность нейтринных телескопов первого поколения (HT200, AMANDA, ANTARES). С точки зрения исследования диффузного потока нейтрино высоких энергий эффективный объем телескопа при регистрации ливней в диапазоне энергий $5 \times 10^{13} - 10^{18}$ эВ составит $0.1-1 \text{ км}^3$ с угловым разрешением $3-5$ градуса. Это соответствует чувствительности порядка $E^2F \sim 2 \times 10^{-8} \text{ ТэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ к суммарному потоку всех трех типов нейтрино для годичной экспозиции, которая примерно в 50 раз превысит чувствительность телескопов первого поколения и позволит вести исследования энергетического спектра, а также глобальной и локальной угловой анизотропии диффузного потока в области его значений, не противоречащих существующим теоретическим ограничениям. В задачах регистрации нейтрино от аннигиляции массивных слабовзаимодействующих частиц (WIMP), в частности нейтралино, в центре Земли и Солнца чувствительность HT1000 в диапазоне массы нейтралино $>100 \text{ ТэВ}$ превысит более чем на порядок чувствительность, достигнутую в эксперименте SuperKamiokande. В задаче поиска быстрых магнитных монополей за год экспозиции будет достигнута чувствительность к потоку на уровне $\sim 3 \times 10^{-18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$.

На протяжении третьего этапа и всего проекта проводились штатные сеансы исследований природных потоков элементарных частиц с помощью глубоководных черенковских детекторов на озере Байкал: нейтринных телескопов HT200, HT200+, экспериментальной гирлянды и прототипа кластера нейтринного телескопа HT1000. Зарегистрировано более 400 миллионов событий, в результате обработки данных получены новые знания об особенностях генерации в атмосфере мюонов и нейтрино высоких энергий, их прохождении в веществе и угловых спектрах мюонов и нейтрино на глубине 1 км. Получены новые более строгие экспериментальные ограничения на величины потоков медленных и релятивистских магнитных монополей, диффузный поток внеземных нейтрино высоких энергий, поток нейтрино в направлении из центра Земли, поток мюонов высоких энергий.

Основным инструментом исследования космических лучей в рамках проекта является установка Тунка-133, которая была введена в строй досрочно в сентябре 2009 года. Установка Тунка-133 строилась в сотрудничестве с НИИЯФ МГУ, научно-исследовательским центром DESY (ФРГ) и Туринским университетом (Италия). При

создании установки были использованы все достижения современной электроники (передача информации по оптоволоконным кабелям, сверхбыстрые АЦП с частотой 200 МГц, перепрограммируемые логические матрицы), что качественно улучшило информацию о регистрируемых событиях. В настоящее время установка Тунка-133 является крупнейшей в мире черенковской установкой позволяющей проводить исследования космических лучей единым методом в диапазоне $10^{15} - 10^{18}$ эВ. Разработаны методы восстановления основных характеристик ШАЛ (положение оси, энергия, глубина максимума) как с использованием функции пространственного распределения черенковского света, так и с использованием зависимости длительности светового импульса от расстояния до оси ливня (функция длительность-расстояние). Для установки Тунка-133 точность восстановления положения оси составляет 5 м и точность определения энергии 15%. Точность определения глубины максимума ШАЛ около 25 г/см^2 . При этом ошибки уменьшаются с ростом энергии регистрируемых ШАЛ.

За первые 2 года работы установки Тунка-133 (562 час наблюдений) было зарегистрировано около 400 событий с энергиями выше 10^{17} эВ. По этим данным восстановлен энергетический спектр первичных космических лучей, который свидетельствует о существенно более сложной зависимости интенсивности космических лучей от энергии, чем предполагалось ранее. В спектре наблюдаются две статистически обеспеченные особенности: резкое изменение наклона спектра при энергии $2 \cdot 10^{16}$ эВ и значительное повышение интенсивности («пик») при энергии $8 \cdot 10^{16}$ эВ. Из анализа поведения массового состава получено указание на «облегчение» состава при энергии выше 10^{17} эВ.

В августе 2010 года на Астрофизическом полигоне ФГБОУ ВПО «ИГУ» в Тункинской долине установлен сдвоенный робот-телескоп «МАСТЕР II», который имеет два объектива с фокусным расстоянием 1000 мм, апертурой 400 мм и полем зрения 2×2 градуса, установленных на монтажке NTM-500 от фирмы ASTELCO. Только за первую половину 2011 года выполнено наибольшее в мире число наблюдений собственного оптического излучения гамма-всплесков, в 5 случаях осуществлено самое раннее наблюдение гамма-всплесков. (гамма-всплесков, по-видимому, сопровождавшихся образованием быстровращающихся черных дыр). Открыта поляризация оптического излучения недавно вспыхнувшего «Блазара» (сверхмассивная черная дыра на расстоянии нескольких миллиардов световых лет). Открыто 2 оптических транзиента (вспышечный источник) неизвестной природы. Один из них ранее наблюдался как источник рентгеновского излучения. Открыто несколько сверхновых звезд, из которых одна – самая яркая сверхновая с начала года

В области теоретических исследований получены новые результаты расчета потока прямых мюонных нейтрино в рамках двух феноменологических подходов – рекомбинационной кварк-партонной модели (РКПМ) и модели кварк–глюонных струн (МКГС), результаты которых показывают, по сути, границы, в которых находятся предсказания, полученные с использованием КХД-расчетов (NLO-приближение). Модель кварк–глюонных струн, представляющая непертурбативное феноменологическое описание динамики мягких процессов, является наиболее успешно развиваемой моделью рождения очарованных частиц. Она удовлетворительно описывает большое количество данных по адронным взаимодействиям, в т. ч. эффекты асимметрии лидирования, и, по-видимому, допускает расширение с включением механизма рекомбинации и примеси внутреннего чарма. Результаты выполненного расчета согласуются с измерениями спектра атмосферных нейтрино высоких энергий и пределам на диффузные потоки астрофизических нейтрино, установленные на нейтринных телескопах NT200+, AMANDA-II и IceCube.

Проведенные в рамках проекта исследования с помощью Байкальского нейтринного телескопа, детектора ТУНКА-133, робот – телескопов МАСТЕР II – уникальных современных российских установок, позволили получить результаты мирового уровня в области физики высоких энергий, нейтринной астрофизики, физики космических лучей и наук о Земле, успешно конкурируя с зарубежными исследованиями и существенно дополняя их.

Важнейшим результатом работы стало то, значительная часть исследований была выполнена студентами, аспирантами и молодыми учеными Иркутского государственного университета. Возможность работать на уникальных физических установках под руководством ведущих ученых из ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ГАИШ МГУ, DESY и других организаций стало важнейшим стимулом повышения интереса к творческой деятельности и закрепления талантливой молодежи в науке

Результаты исследований доложены на многих международных конференциях и использованы в 28 статьях, опубликованных в высокорейтинговых российских и международных научных журналах, при модернизации и разработке 4 курсов лекций, проведении практических и лабораторных занятий.

Руководитель работ

Н.М. Буднев