

АННОТАЦИЯ ПО ПРОЕКТУ

Государственный контракт №14.740.11.0890 от «29» апреля 2011 г.

Тема: «Поиск и исследование источников космических лучей, гамма-излучения и нейтрино высоких энергий ($E > 10$ ТэВ) в Галактике и за ее пределами с помощью крупномасштабных детекторов – нейтринных телескопов и установок для регистрации ШАЛ»

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет», г. Иркутск

Ключевые слова: нейтринная астрофизика высоких энергий, космические лучи, широкие атмосферные ливни, Байкальский глубоководный нейтринный телескоп, черенковская установка Тунка-133.

1. Цель проекта

1. Проект направлен на исследование природы астрофизических источников заряженных частиц, гамма-квантов и нейтрино высоких энергий, поиск новых форм материи с помощью нейтринных телескопов на озере Байкал и уникальных установок астрофизического полигона ФБГОУ ВПО «ИГУ» в Тункинской долине, а также изучение физических процессов при высоких энергиях в астрофизических объектах, атмосфере и грунте Земли. Важнейшая цель проекта - привлечение работающих за рубежом российских и иностранных ученых к участию в крупномасштабных международных астрофизических экспериментах, проводимых в России, использование их опыта, навыков и знаний, передовых технологий для развития научных исследований в Прибайкалье и улучшения физического образования в Иркутском государственном университете.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по проекту стали существенным вкладом в решение фундаментальных вопросов о механизмах ускорения частиц до сверхвысоких энергий в астрофизических объектах. С помощью уникальных установок NT200, NT200+, Тунка-133 получены новые экспериментальные данные о потоках элементарных частиц и ядер высоких энергий, которые являются ключом к пониманию перехода от Галактических источников космических лучей к внегалактическим, проявляющегося как излом в их спектре при энергии 300 ПэВ. Начато создание гигантских установок: Байкальского нейтринного телескопа NT1000 с объемом в 1 куб. км и гамма-обсерватории Tunka-HiSCORE площадью 10 кв. км, с помощью которых станет возможным с рекордной чувствительностью в одном месте вести исследование всех компонент космического излучения высоких энергий.

2. Основные результаты проекта

1) При выполнении государственного контракта получены следующие основные результаты:

- рассчитаны потоки π - и K -мезонов как основных источников генерации атмосферных нейтрино – фона для поиска астрофизических нейтрино;
- рассчитаны энергетические спектры и зенитно-угловые распределения атмосферных нейтрино от распадов - π - и K -мезонов, исследованы процессы поглощения и регенерации мюонных нейтрино при прохождении сквозь Землю;
- исследован вклад очарованных частиц в потоки атмосферных нейтрино и выполнен расчет полного фона атмосферных нейтрино
- разработан метод выделения мюонов из нижней полусферы Земли, коррелирующих со вспышками рентгеновского и гамма-излучения;
- получены новые экспериментальные данные о природных потоках мюонов и нейтрино с энергией выше 20 ГэВ;
- получены новые экспериментальные данные об энергетическом спектре и массовом составе космических лучей в области энергий 10-1000 ПэВ.

2) При выполнении исследований по проекту создана следующая научная продукция:

- Создан прототип кластера Байкальского глубоководного нейтринного телескопа NT1000 объемом порядка кубического километра.
- Разработан проект, изготовлены и установлены для тестовых испытаний экспериментальные образцы оптических станций гамма-обсерватории Tunka-NiSCORE.
- Созданы быстродействующие программы расчета спектров и угловых распределений атмосферных нейтрино.
- Исследован вклад очарованных частиц в поток атмосферных мюонных нейтрино, предсказано удвоение этого потока при энергиях 300 ТэВ.
- Рассчитанный полный фон атмосферных нейтрино существенно зависит от модели адрон-ядерного взаимодействия, основной источник неопределенности расчета - процессы рождения каонов и очарованных частиц в нуклон-ядерных соударениях
- Для реконструкции спектра нейтрино на поверхности Земли по зарегистрированным в детекторе событиям при энергиях выше 20 ТэВ необходимо учитывать процессы поглощения и регенерации нейтрино.

3) На основе анализа данных HT200 были установлены новые ограничения на величину природного потока релятивистских ($v/c > 0.8$) магнитных монополей - $4.6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, на поток мюонов, сопровождающих аннигиляцию массивных частиц темной материи в центре Земли - $4.2 \cdot 10^{-15} \text{ мюонов/см}^2$, на интенсивность диффузного потока всех типов нейтрино - $8.1 \cdot 10^{-7} \text{ ГэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ ($100 \text{ ТэВ} < E_\nu < 10 \text{ ПэВ}$).

Восстановленный по данным установки Тунка-133 энергетический спектр космических лучей в диапазоне энергий $6 \cdot 10^3 \text{ ПэВ}$ имеет более сложную структуру, чем ожидалось: показатель γ наклона спектра дважды изменяется – $\Delta\gamma_1 = -0.2$ (20 ПэВ) и $\Delta\gamma_2 = 0.3$ (300 ПэВ). Укручение спектра вблизи 100 ПэВ можно интерпретировать, как «второе колено» в энергетическом спектре, связанное с переходом от галактических к внегалактическим космическим лучам. Другим фактом, указывающим на переход к внегалактической компоненте космических лучей, является уменьшение среднего логарифма атомного веса при энергии выше 100 ПэВ.

4) Метод изучения энергетического спектра и химического состава первичных КЛ с помощью установки Тунка-133 основан на регистрации пространственно – временной структуры черенковского света ШАЛ. В этом случае атмосфера Земли играет роль калориметра для частиц высоких энергий, который сглаживает флуктуации, характерные для заряженной компоненты. Черенковский метод позволяет измерять энергию первичной частицы наиболее точно, независимо от модели адрон–ядерного взаимодействия, изучать тонкую структуру спектра, что важно для понимания природы источников космических лучей высоких энергий. Энергетический спектр космических лучей, восстановленный по данным установки Тунка-133 наилучшим образом согласуется с результатами, представленными коллаборацией KASCADE-Grande.

3. Назначение и область применения результатов проекта

Исследования, проведенные с помощью Байкальских нейтринных телескопов HT200, HT200+ и установки ТУНКА-133 – крупнейших современных российских установок, позволили получить результаты мирового уровня в области нейтринной астрофизики, физики космических лучей, физики высоких энергий и наук о Земле, которые успешно конкурируют с результатами зарубежных исследований и существенно дополняют их. Выполнение данного проекта стало важным вкладом в эту работу. За прошедшие два года удалось значительно расширить круг проводимых исследований и

ускорить выполнение перспективных планов по развитию комплекса уникальных астрофизических установок NT1000 и Tunka-HiSCORE в Прибайкалье.

Создание на Байкале глубоководного нейтринного телескопа NT1000 с эффективным объемом порядка кубического километра позволит вести наблюдение южной небесной полусферы – центра Галактики и той части галактического диска, где сосредоточена большая часть потенциальных галактических источников космических лучей, гамма-излучения и нейтрино высоких энергий. Строительство новой гамма-обсерватории – Tunka-HiSCORE – позволит начать исследование нового волнового диапазона в гамма-астрономии на высоком уровне чувствительности, открыть неизвестные ранее источники и, возможно, новые типы источников, в частности, источники галактических космических лучей с энергией выше 1 ПэВ. Изучение новых механизмов ускорения заряженных частиц, исследование процесса распространения гамма-квантов высокой энергии в межгалактической среде, поиск частиц темной материи, измерение энергетический спектра и массового состава космических лучей на ранее недостижимом уровне статистической обеспеченности в диапазоне $10^{14} - 10^{18}$ эВ дополнит исследования гамма-источников и позволит глубже понять происхождение космических лучей.

Развитые при создании установок NT1000 и Tunka-HiSCORE уникальные технические решения будут востребованы при разработке и создании других распределенных многопроцессорных информационно – измерительных систем как научного, так и производственного назначения. На базе разработанных в рамках проекта методов и технологий возможно создание систем долговременного многопараметрического мониторинга биогеохимических и гидрофизических процессов в озере Байкал, которые необходимы для развития стратегии рационального природопользования в озере Байкал.

4. Вклад приглашенного руководителя в проект

Выполнение данного проекта под руководством профессора П.Г. Тинякова из теоретического отдела Свободного Университета Брюсселя – одного из ведущих исследователей в астрофизике и физике высоких энергий.

Профессор П.Тиняков принял активное участие в постановке наиболее актуальных задач, разработке программ выполнения курсовых и дипломных работ студентами, в выборе направлений диссертационных исследований аспирантами и молодыми сотрудниками ИГУ, в обсуждении актуальных вопросов экспериментальной и

теоретической астрофизики, консультировании молодых участников проекта – очно, во время пребывания в Иркутском университете, и заочно, посредством сети Интернет.

Важное значение имело активное участие профессора Тинякова в Байкальских международных летних школах по физике элементарных частиц и астрофизике, которые проходили в июле 2011 и июле 2012 годов в п.Б.Коты на озере Байкал. Цель Школ – способствовать эффективному освоения молодыми исследователями лучших научных и методических отечественных и мировых достижений в области теоретической и экспериментальной физики (ядерной физики, физики высоких энергий, астрофизики, физики космических лучей). Уровень лекций и семинаров в целом был высоким, но в то же время ориентированным на студенческую аудиторию. Практически ежедневно в конце рабочего дня Школы с результатами собственных научных исследований выступали студенты, аспиранты и молодые исследователи. Во время работы Школы участники имели возможность общаться с профессором Тиняковым и другими ведущими учеными в области физики высоких энергий и астрофизики, обсуждать научные проблемы и мировоззренческие вопросы, связанные с различными сторонами жизни общества.

В рамках Школ профессор П.Г.Тиняков прочитал несколько циклов лекций по актуальным проблемам современной астрофизики, физики космических лучей и физики элементарных частиц: 1) Проявления темной материи в галактиках, свойства темной материи; 2) Возможные кандидаты на роль частиц темной материи, рождение частиц темной материи и методы их детектирования; 3) Космические лучи сверхвысоких энергий, их распространение и взаимодействие с магнитными полями и межзвездным веществом, источники и механизмы ускорения частиц в астрофизических источниках излучения высокой энергии; 4) Методы детектирования космического излучения высокой энергии и современные экспериментальные установки для исследования спектра и состава космических лучей. Для установления обратной связи между студентами и лекторами ежедневно устраивались семинары и практические занятия, на которых решались задачи по теме каждой прочитанной лекции. Материалы лекций в виде файлов pdf и ppt-презентаций были доступны всем участникам Школ, сами лекции записывались онлайн на видеокамеру. Плотность и интенсивность занятий в летних Школа были очень высоки – объем лекционного и семинарского материала заметно превосходил объем двух-трех обычных семестровых курсов в университете.

5. Достижения молодых исследователей – участников проекта

Выполнение проекта позволило внедрить новые методики исследования, получить современное научное оборудование; облегчить доступ к дополнительным информационным ресурсам, которых ранее у научного коллектива не было, расширить контакты с зарубежными научными организациями и отдельными учеными, которые, в частности, приезжали для чтения лекций на Байкальской международной летней школе по физике элементарных частиц и астрофизике (2011, 2012 гг., п. Б. Коты на озере Байкал.).

Непосредственное участие студентов, аспирантов, молодых научных сотрудников и преподавателей Иркутского государственного университета в проведении исследований в рамках Байкальского нейтринного проекта стало действенным стимулом повышения у талантливых молодых людей интереса к творческой деятельности, способствовало их закреплению в науке и высокотехнологичных секторах экономики.

В проекте принимал участие молодой исследователь Рябов Е.В., к.ф.м.н., нс НИИПФ ИГУ. При его непосредственном участии получены следующие результаты: разработан гидрооптический комплекс ВАИКАЛ-4D для долговременного мониторинга первичных оптических свойств водной среды в пределах эффективного объема нейтринного телескопа НТ1000, в том числе соответствующие мировому уровню в области гидрооптики, что позволит использовать полученные результаты в Байкальском нейтринном эксперименте и продолжить исследования в направлении изучения природных потоков элементарных частиц высоких энергий с помощью глубоководных черенковских детекторов в озере Байкал.

В проекте принимал участие молодой исследователь Паньков А.В., к.ф.м.н., нс НИИПФ ИГУ. При его непосредственном участии получены следующие результаты: разработана методика акустической регистрации нейтрино высоких энергий в озере Байкал, в том числе соответствующие мировому уровню в области нейтринной астрофизики, что позволит использовать полученные результаты в Байкальском нейтринном эксперименте и продолжить исследования в направлении поиска нейтрино сверхвысоких энергий.

В проекте принимала участие молодой исследователь Перевалова И.А., к.ф.-м.н., ассистент каф. теоретической физики ИГУ. При ее непосредственном участии разработан формализм функции Вигнера для описания упругих процессов взаимодействия нуклонов, получены выражения для амплитуды и профильной функции в рамках приближения малых поперечных импульсов, что позволит использовать полученные результаты в расчете широких атмосферных ливней и продолжить исследования космических лучей на установке Тунка-133.

В проекте принимал участие молодой исследователь Богородский Д.Ю., нс НИИПФ ИГУ. При его непосредственном участии получены следующие результаты: исследованы процессы прохождения нейтрино сверхвысоких энергий в Земле, построена модель генерации и распространения акустических сигналов от каскадных ливней в байкальской воде, в том числе соответствующие мировому уровню в области нейтринной астрофизики, что позволит использовать полученные результаты в Байкальском нейтринном эксперименте и продолжить исследования в направлении поиска нейтрино высоких энергий.

В проекте принимал участие молодой исследователь Коробченко А.В., аспирант ИГУ. При его непосредственном участии получены следующие результаты: создана пилотная стационарная гирлянда для поиска нейтрино акустическим методом в озере Байкал, в том числе соответствующие мировому уровню в области нейтринной астрофизики, что позволит использовать полученные результаты в Байкальском нейтринном эксперименте и продолжить исследования в направлении поиска нейтрино сверхвысоких энергий.

В проекте принимал участие молодой исследователь Загородников А.В., инженер - электроник НИИПФ ИГУ. При его непосредственном участии удалось получить следующие результаты: создать прототип кластера Байкальского нейтринного телекопа NT1000, в том числе соответствующие мировому уровню в области гидрооптики, что позволит использовать полученные результаты в Байкальском нейтринном эксперименте и продолжить исследования в направлении изучения природных потоков элементарных частиц высоких энергий с помощью глубоководных детекторов в озере Байкал.

В проекте принимал участие молодой исследователь Пахоруков А.Л. аспирант ИГУ. При его непосредственном участии разработан опытный экземпляр оптической станции гамма – обсерватории Tunka-HiSCORE, в том числе соответствующие мировому уровню в области гамма -астрономии, что позволит использовать полученные результаты при создании установки для регистрации гамма – квантов высоких энергий Tunka-HiSCORE и продолжить исследования в направлении поиска пэватронов и исследования природы источников космических лучей высоких энергий.

В проекте принимала участие молодой исследователь Казарина Ю.А., аспирант ИГУ. При ее непосредственном участии удалось получить следующие результаты исследовать естественный фон для регистрации радио импульсов от ШАЛ и разработать методику выделения радиосигналов от ШАЛ в данных установки Тунка – радио расширение, в том числе соответствующие мировому уровню в области физики космических лучей, что позволит использовать полученные результаты при создании

установки для исследования космических лучей высоких энергий сетодом регистрации радио излучения ШАЛ.

6. Опыт закрепления молодых исследователей – участников проекта в области науки, образования и высоких технологий

В рамках данного проекта значительное число студентов, аспирантов, молодых исследователей и преподавателей Иркутского государственного университета приняли участие в исследованиях на уникальных установках НТ200+, НТ1000 и Тунка-133, что стало важным фактором для привлечения молодых людей в науку, они стали участниками крупномасштабных физических экспериментов, получили возможность работать на современном оборудовании, изучить методики измерений, обработки и анализа данных, построения теоретических моделей. В ходе выполнения проекта в аспирантуру ИГУ поступили: А.Л.Пахоруков, Ю.А.Казарина, В.Ю.Савинов, приняты на работу в НИИ прикладной физики ИГУ выпускники ИГУ и аспирантуры ИГУ: А.В.Загородников, А.Л.Паньков, И.А. Портянская, Д.Ю.Богородский, Е.В.Светницкий, Р.Д.Монхоев, студенты ИГУ: Е.Н.Константинов, Н.С.Заборик; аспиранты ИГУ: А.Л.Пахоруков, Ю.А.Казарина, В.Ю.Савинов, А.В.Коробченко, И.А. Перевалова. Результаты работы по проекту используются при подготовке диссертаций, являются основой дипломных и курсовых работ.

Основные проблемы при выполнении проекта были связаны с графиком поступления средств, не согласованным с необходимостью ежемесячной выплаты заработной платы участникам проекта и оплат по прочим статьям в первую половину года. Но гораздо сложнее будет решать вопрос заработной платы трудоустройства принятых на работу по проекту молодых исследователей после окончания срока Госконтракта. Проблема связана с тем, что Иркутский государственный университет не имеет ни одной бюджетной ставки по науке. Все средства (в том числе на заработную плату, оплату электроэнергии и т.д.) для работы в рамках Байкальского нейтринного проекта и Тункинского астрофизического проекта ИГУ получает на конкурсной основе, а конкурсы проводятся так, что даже при условии достаточного объема выигранных грантов по году, чрезвычайно трудно выплачивать заработную плату и проводить работы в первом полугодии. Самым тяжелым является неопределенность с вопросом о продолжении ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» после 2013, а именно из этой программы обеспечивается основной объем финансирования научных исследований в ИГУ после 2009 года.

7. Перспективы развития исследований

Выполнение, начиная с 2009 года, в научно-образовательном центре «Физика элементарных частиц и астрофизика» Иркутского государственного университета ряда государственных контрактов ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» в областях: «Ядерная физика. Физика элементарных частиц и полей. Космология» и «Астрономия, астрофизика и исследования космического пространства», в том числе по мероприятию 1.5 способствовало широкому международному признанию высокого уровня теоретических и экспериментальных исследований, ведущихся в ИГУ в рамках Байкальского нейтринного проекта и на Астрофизическом полигоне ИГУ в Тункинской долине. Показателями этого признания являются: поддержка в октябре 2011 года обществом Гельмгольца и РФФИ (программа Helmholtz «HRJRG») проекта «Исследования гамма-лучей и заряженных космических лучей в Тункинской долине в Сибири с помощью инновационных технологий»; включение исследований, ведущихся на Астрофизическом полигоне ИГУ в Тункинской долине, в план перспективных исследований Европейского общества ASPERA-2; готовящееся в настоящее время соглашение о вхождении Байкальского нейтринного телескопа в состав Глобальной Нейтринной обсерватории.

В рамках новых проектов в исследования в области физики космических лучей, гамма астрономии и физики высоких энергий, ведущиеся на базе Астрофизического полигона ИГУ в Тункинской долине, включилось 6 научных организаций и университетов Германии (DESY, KIT, Гамбургский университет и т.д.), Туринский университет (Италия), а также Канзасский университет (США), которые осуществляют поставку на безвозмездной основе дорогостоящего научного оборудования, ученые этих организаций приезжают в Иркутск для совместных исследований, чтения лекций и проведения практических занятий.

В последние 5 лет в Иркутском государственном университете выполнено более 20 проектов в области физики высоких энергий, астрофизики и астрономии, финансируемых РФФИ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» и из других источников.

Наибольшая отдача для развития в России технологий в области исследования фундаментальных проблем физики высоких энергий и астрофизики может быть получена за счет сотрудничества с Германией и Италией. Наиболее амбициозными в настоящее время являются крупнейшие реализуемые на территории России проекты по строительству гамма-обсерватории Tunka-HiSCORE (Hundred Square-km Cosmic Origin

Explorer) площадью до 100 кв.км и Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 объемом до 1 куб. км. В рамках этих уникальных проектов иностранные партнеры ведут поставку высокотехнологичного оборудования, которое используется как в научных, так и в учебных целях, что позволяет значительно повысить уровень физического образования в Иркутском государственном университете.

Руководитель работ по проекту

Профессор

_____ С.И. Синеговский