

## АННОТАЦИЯ ПО ПРОЕКТУ

**Государственный контракт № П 681 от 20 мая 2010 г**

**Тема:** «Экспериментальные и теоретические исследования энергетического спектра и элементного состава космических лучей высоких энергий» по направлению «Астрономия, астрофизика и исследования космического пространства».

**Исполнитель:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» (ФГБГОУ ВПО «ИГУ») 664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1.

**Ключевые слова:** галактические и внегалактические космические лучи, широкие атмосферные ливни, Байкальский глубоководный нейтринный телескоп, черенковская установка Тунка-133.

В рамках данного проекта выполнен комплекс экспериментальных исследований на установке Тунка-133 и работ по расширению установки путем включения в ее состав дополнительных детекторов черенковского и радиоизлучения ШАЛ, заряженных частиц, внедрения новых методик калибровки, синхронизации, измерений, разработки оригинальных методов обработки и анализа данных, восстановления основных характеристик космических лучей по данным измерений. Теоретические исследования включали разработку модели ядерного каскада в атмосфере и метода расчета характеристик потоков адронов и мюонов, на основе которого изучены вклады различных источников мюонов – заряженных  $\pi$ - и  $K$ -мезонов, нейтральных каонов, цепочек распадов каонов. Для области сверхвысоких энергий сделан прогноз поведения спектров “прямых” мюонов с учетом растущего с энергией вклада очарованных частиц. Поток мюонов от распада очарованных частиц при энергиях 10-1000 ТэВ слабо зависит от зенитных углов, в отличие от обычных мюонов от  $\pi$ -,  $K$ -распадов, что может служить сигнатурой этой компоненты при соответствующем угловом разрешении установки.

Важным результатом выполнения проекта является вклад в международное признание высокого уровня астрофизических исследований, ведущихся на базе Астрофизического полигона ИГУ в Тункинской долине: Научный совет РАН по комплексной проблеме "Космические лучи" 7 июля

2012 одобрил создание гамма-обсерватории Tunka-HiSCORE (Tunka-Hundred Square-km Cosmic ORigin Explorer) площадью до 100 кв.км, которая станет первой в России и крупнейшей в мире установкой для регистрации гамма-квантов с энергиями 10 ТэВ – 1000 ПэВ по технологии без создания изображения. Эти работы были начаты в 2012 году, в частности, в рамках совместного германо-российского проекта «Исследования гамма-лучей и заряженных космических лучей в Тункинской долине в Сибири с помощью инновационных технологий», поддержанного в октябре 2011 года обществом Гельмгольца и РФФИ (программа Helmholtz «HRJRG»).

Основные научные результаты выполнения проекта:

1. Накопленные экспериментальные данные о широких атмосферных ливнях, полученные за три сезона измерений: зарегистрировано более 4 млн. событий с энергией выше 10 ПэВ.

2. Результаты восстановления энергетического спектра и элементного состава первичных космических лучей в диапазоне энергий от 6 ПэВ – 1 ЭэВ по данным 3-х зимних сезонов работы установки Тунка-133. Восстановленный спектр имеет более сложную структуру, чем предполагалось ранее: в спектре наблюдаются две статистически обеспеченные особенности: до 20 ПэВ показатель наклона энергетического спектра уменьшается примерно на 0.2, а при энергии 300 ПэВ наклон спектра увеличивается на ~0.3. Укручение спектра при энергии 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 номера при энергии выше 100 ПэВ.

3. Модель, позволяющая рассчитать пространственно-временные характеристики черенковских импульсов от ШАЛ с энергией выше 1 ПэВ, с помощью которых осуществлена реконструкция событий, зарегистрированных на установке Тунка-133.

4. Методы восстановления энергетического спектра и массового состава космических лучей высоких энергий по результатам совместных измерений характеристик черенковского излучения ШАЛ с помощью установки Тунка-133 и внешних кластеров для событий, ось которых лежит за пределами геометрической площади установки. Ключевым элементом новых методов

является переход к функции амплитуда-расстояние, вместо традиционно используемой функции пространственного распределения черенковского света. Принципиальная возможность такого перехода обусловлена тем, что на установке Тунка-133 ( и только на ней) ведется оцифровка формы импульсов со всех детекторов с частотой 200 МГц. Достигнутая точность восстановления энергии ШАЛ составляет около 15%, а точность восстановления глубины максимума развития ШАЛ -  $25 \text{ г/см}^2$ .

5. Методика реконструкции параметров ШАЛ по результатам совместных измерений с помощью установки Тунка-133 и сцинтилляционными детекторами большой площади.

6. Разработка и создание системы дополнительных 6 кластеров черенковских детекторов, расположенных на расстоянии 1 км от центра установки, что позволило увеличить до 3 кв. км эффективную площадь регистрации событий с энергией выше  $10^{17}$  эВ. Развертывание дополнительных кластеров позволило увеличить эффективную площадь установки в 4 раза для событий с энергией выше  $10^{17}$  эВ, что позволяет зарегистрировать за год наблюдений 20-30 событий с энергией более 100 ПэВ, и добиться перекрытия диапазона измерений установки Тунка-133 с диапазоном гигантской установки Pierre Auger Observatory (Аргентина).

7. Разработка методики временной синхронизации черенковских детекторов установки Тунка-133 с внешними кластерами с погрешностью порядка 3 нс с помощью светодиодного источника высокой яркости (1012 фотонов в импульсе).

8. Разработка метода регистрация радиоизлучения ШАЛ в условиях Тункинского эксперимента и создание сети из 20 радиоантенн для совместной работы с установкой Тунка-133. Практическая всепогодность регистрации ШАЛ в любое время суток является серьезным преимуществом радиометода.

9. Разработка методики регистрации мюонов и электронов ШАЛ в условиях Тункинского эксперимента, разработка конструкции, электронного оборудования и программного обеспечения для экспериментальных образцов сцинтилляционных детекторов большой площади для измерений мюонной компоненты ШАЛ совместно с установкой Тунка-133. Оценки точности показали, что данные сцинтилляционных детекторов площадью 10 кв. м позволяют восстанавливать параметры ШАЛ в области 100-1000 ПэВ с

небольшими ошибками:  $\sim 1^\circ$  для зенитного угла,  $\sim 2^\circ$  для азимутального угла,  $\sim 10$  м для погрешности определения оси ливня.

10. Разработка метода решения уравнений адронного каскада в атмосфере Земли, позволяющего оперативно проводить необходимые вычисления с использованием экспериментальных данных по спектру и составу первичных космических лучей, и полученные на основе этого метода результаты расчета энергетических спектров адронов и мюонов космических лучей в атмосфере Земли для ряда моделей взаимодействий адронов высоких энергий.

11. Результаты исследования вклада различных источников мюонов (включая очарованные частицы), генерируемых в ливне и анализ чувствительности потоков мюонов к спектру и составу первичных космических лучей в окрестности излома спектра. Исследование согласованности данных различных экспериментов на основе сравнения последних с расчетом потоков адронов и мюонов, выполненного для набора высокоэнергетических моделей адрон-ядерных взаимодействий, встроенных в пакет программ CORSIKA для моделирования ШАЛ, и оценка неопределенностей расчета, вносимых этими моделями.

12. Моделирование методом Монте-Карло плотности черенковского излучения и построение аппроксимирующих функций зависимости плотности от расстояния от оси ливня, энергии и типа первичной частицы.

Расчет энергетических спектров нуклонов, адронов, спектра и угловых распределений мюонов космических лучей в атмосфере Земли выполнен для разных моделей адронных взаимодействий и нескольких параметризацией спектра и состава первичных космических лучей, опирающихся на экспериментальные измерения. Сравнение результатов расчета с данными экспериментов показало, что используемые приближения в целом правильно отражают физическую картину генерации и прохождения частиц высоких энергий через атмосферу. Расчет с использованием данных в области энергий  $10-10^4$  ГэВ, полученных с высокой точностью в эксперименте ATIC-2 позволяет увидеть заметное проявление различия адронных моделей (QGSJET, SIBYL), используемых в качестве референтных в расчетах ШАЛ. Ожидается, что эксперимент LHCf на Большом Адронном Коллайдере в ближайшие годы

позволит внести необходимые уточнения в модели адронных взаимодействий в области очень высоких энергий.

Исследование вкладов различных источников мюонов (заряженных пионов и каонов, нейтральных каонов, цепочек распадов каонов) показало, что доминирующим каналом является  $\pi_{\mu 2}$ -распад (до 80% полного потока мюонов при энергиях до 10 ТэВ),  $K_{\mu 2}$ -мода дает 15-20%. полулептонные моды  $K_{\mu 3}$  дают при этих энергиях не более 3-5% потока. При энергиях, больших 50 ТэВ, необходимо учитывать вклады от распадов короткоживущих очарованных частиц, сечения рождения которых в настоящее время предмет особого внимания и интереса: экспериментальные данные ограничены и очень велики расхождения в предсказаниях моделей, что приводит к различию на порядки в расчетных потоках мюонов. В области излома спектра ПКЛ существует интервал энергий, где неопределенности, связанные с рождением очарованных частиц накладываются на неточности спектра и состава ПКЛ.

На заключительном этапе выполнены запланированные исследования и осуществлен комплекс работ по дальнейшему развитию установки Тунка-133: 1) проведены штатные сеансы совместных наблюдений с помощью установки Тунка-133, сцинтилляционных детекторов большой площади и внешнего кластера черенковских детекторов; 2) проведены практические занятия со студентами и аспирантами ИГУ на Астрофизическом полигоне в Тункинской долине; 3) выполнена обработка экспериментальных данных по энергетическому спектру и элементному составу космических лучей в области энергий 1 – 1000 ПэВ; 4) выполнен анализ научных результатов, полученных с помощью комплекса установок астрофизического полигона ГОУ ВПО «ИГУ» в Тункинской долине, сравнение с результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов; 5) разработаны предложения по развитию исследований в области астрофизики, физики космических лучей и физики высоких энергий на астрофизическом полигоне ИГУ; 6) разработаны рекомендации по использованию результатов НИР при создании новых и модернизации существующих курсов лекций для студентов, магистрантов и аспирантов и учебных пособий в традиционном и доступном через Интернет форматах, проведению производственной практики, руководству курсовыми и

дипломными работами по специальностям 010701 "Физика" и 010801 "Радиофизика и электроника».

По результатам исследований опубликовано 10 статей в ведущих российских и зарубежных журналах: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Nuclear Physics B, Письма в ЭЧАЯ, Геомагнетизм и аэрономия и др.

В настоящее время установка Тунка-133 является крупнейшей в мире установкой, позволяющей проводить исследования космических лучей в диапазоне энергий  $10^{15}$ - $10^{18}$  эВ методом регистрации черенковского света с единой энергетической калибровкой, что позволяет снять все сомнения в изменении состава и существовании второго «колена» в спектре космических лучей. Проведенные в рамках проекта исследования с помощью уникальной современной российской установки Тунка-133 позволили получить результаты мирового уровня в области физики высоких энергий и физики космических лучей и успешно конкурировать с зарубежными исследованиями, существенно дополняя их.

Была выполнена основная задача образовательной части выполненного проекта – развитие сложившихся и разработка новых форм подготовки специалистов в области астрофизики, астрономии, исследований космического пространства, физики высоких энергий, физики детекторов, радиофизики, микропроцессорных систем на базе интеграции с ведущими научными и образовательными учреждениями России (ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ГАИШ МГУ) и зарубежных стран. Студенты, аспиранты и молодые сотрудники Иркутского государственного университета принимали активное участие в проведении исследований на всех этапах проекта. Работа на уникальных физических установках под руководством ведущих ученых из ИГУ, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, DESY и других организаций стала хорошей школой для талантливой молодежи и способствовала развитию ее интереса к научной деятельности.

Руководитель проекта,

д. ф.-м. н., профессор

С. И. Синеговский