

Пояснительная записка

1. Наименование научно-исследовательской работы

Исследования астро- и ядернофизического аспектов взаимодействий адронов сверхвысоких энергий вблизи максимума ШАЛ при энергиях $10^{15} - 10^{18}$ эВ

1. Изучение стволов ШАЛ комплексной методикой, включающей детекторы высокого пространственного разрешения и ионизационные детекторы больших площадей
2. Разработка проекта высокогорной комплексной системы детекторов компонент ШАЛ в рамках МНИЦ «Памир-Чакалтая»
3. Разработка программ по моделированию развития и регистрации компонент ШАЛ для экспериментов, проводимых МНИЦ «Памир-Чакалтая» и ТШВНС ФИАН

2. Краткий обзор состояния проблемы

Широкие атмосферные ливни (ШАЛ) являются результатом развития ядерно-электромагнитных каскадов, инициируемых частицами первичного космического излучения (ПКИ) сверхвысокой энергии в атмосфере. Исследования ШАЛ являются единственным источником информации как о составе и спектре частиц ПКИ, так и характеристиках адрон-ядерных взаимодействиях в области энергий выше $\sim 10^{15}$ эВ.

Спектр частиц ПКИ имеет определенные особенности, в частности – укрупнение спектра («колено») при энергиях $E_0 \sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ, представляющее одно из наиболее принципиальных астрофизических (возможно, ядернофизических) явлений. Обычно «колено» интерпретируется в терминах галактической модуляции, т.е. растущей неспособности галактического магнитного поля удерживать частицы. Однако рассматриваются и другие механизмы. Во всех моделях форма спектра определяется вкладом многих источников. Однако данные ШАЛ, указывающие на сложную структуру «колена» и высокую резкость излома, могут указывать на вклад космических лучей от относительно близкого взрыва одной из таких сверхновых, как Monogem, Loop-1, Vela и Geminga. До сих пор не опровергнуты предположения, что «колено» является результатом существенного изменения характеристик адрон-ядерных взаимодействий.

Экспериментальные данные получены путем наблюдения вторичных компонент ШАЛ в течение примерно пятидесяти лет. Результаты различных групп (и даже одного эксперимента *KASCADE*) часто сильно противоречат друг другу. Если по *KASCADE* «колено» определяется очень резким ($I_0 \sim E_0^{-5}$) укрупнением спектра протонов при $E_0 \approx 2 \cdot 10^{15}$ эВ, и спектров более тяжелых ядер в соответствии с их зарядом, интегрально определяя более плавное изменение суммарного спектра ПКИ, то по результатам эксперимента *TIBET* имеет место плавный излом спектра протонов при $E_0 \approx 2 \cdot 10^{14}$ эВ, а «колено» определяется крутым изломом ядер железа.

Очевидно, эти две точки зрения подразумевают совершенно различные астрофизические процессы. При этом эксперимент *KASCADE* проводится на уровне моря (т.е. далеко за максимумом ШАЛ), а высокогорный *TIBET* – в области максимума ШАЛ. Существующие противоречия и неопределённости во многом определяются тем, что, во-первых, в каждом отдельном эксперименте системы детекторов измеряют ограниченное число компонент ШАЛ, а во-вторых, изучение ШАЛ ведётся на больших глубинах в атмосфере за областью максимума, где (если говорить о заряженных частицах) регистрируются, по сути дела, «хвосты» атмосферных каскадов. Давно известно, что гораздо лучше изучать атмосферные каскады как можно ближе к области их максимума (и минимума флуктуаций) и ослабляя отрицательное влияние каскадного развития на информацию о первых взаимодействиях частиц ПКИ.

С другой стороны, в экспериментах, проводимых в области более высоких энергий $E_0 > 10^{15}$ эВ обнаружен (с различной степенью достоверности) ряд явлений, не описываемый традиционными моделями адронных взаимодействий (например, компланарность наиболее энергичных подстволов в стволах ШАЛ, обнаруженная в высокогорных и стратосферных экспериментах с очень высоким пространственным разрешением). Без решения ядерно-физических вопросов невозможно быть уверенным в адекватности решений астрофизических проблем с помощью ШАЛ. Но все существующие в настоящее время установки ШАЛ не имеют детекторов высокого пространственного разрешения. Очень существенно, что неопределённости в выборе адекватной модели взаимодействий, существующие в данной энергетической области, приводят к ещё бóльшим неопределённостям при более высоких энергиях.

Таким образом, остро необходимы новые измерения в области энергий выше «колена» с качественно улучшенным продвижением по числу измеряемых компонент в высокогорных (на глубинах менее 700 г/см^2 в атмосфере) экспериментах для выяснения природы происхождения ПКИ. Как показывают расчеты, для выяснения характеристик адронных взаимодействий особенно важны измерения наиболее энергичных адронов с очень высоким пространственным разрешением.

В настоящее время ведётся активная работа по созданию новой научной аппаратуры на ТШВНС ФИАН. С другой стороны, В 2009 г. в соответствии с межгосударственным договором создан Международный научно-исследовательский центр (МНИЦ) «Памир-Чакалтая» для проведения экспериментов на Памире на высоте 4400 м н.у.м. (на глубине $\sim 600 \text{ г/см}^2$ в атмосфере), что создаёт возможность существенно интенсифицировать исследования в вышеуказанных направлениях.

На ТШВНС, расположенной на глубине ~ 700 г/см² в атмосфере, создаётся комплексная установка ATHLET, главной особенностью которой будет использование ионизационно-нейтронных калориметров для наземных и подземных измерений наряду с подземным мюонным детектором и большим числом сцинтилляционных счетчиков.

В настоящее время в рамках МНИЦ «Памир-Чакалтая» разрабатывается проект комплексной установки для изучения различных компонент ШАЛ на Памире (на глубине ~ 600 г/см² в атмосфере), в частности, с учётом использования опыта, накопленного в проводившихся здесь ранее экспериментах по исследованию тонкой структуры стволов ШАЛ (частиц с очень высокими энергиями от ~ 4 ТэВ и выше) с использованием рентгено-эмульсионных камер (РЭК) с очень высоким (менее 50 микрон) пространственным разрешением.

При всех своих достоинствах, РЭК обладают таким существенным недостатком, как отсутствие временной привязки к моменту регистрации событий. Поэтому целесообразно разрабатывать также электронные детекторы больших площадей с высоким пространственным разрешением, например, на основе дрейфовых камер. Возможно использование РЭК совместно с системой электронной регистрации большого энерговыделения на конкретном участке.

Предполагается также использовать тот факт, что астроклимат в данной местности считается одним из лучших в мире, и включить в состав комплексной установки детекторы черенковского света от ШАЛ.

Наконец, предполагается регистрировать системой из большого числа детекторов мюоны малых энергий, которые дают заметный вклад для наклонных ливней на этой высоте.

Совместное использование в высокогорных экспериментах детекторов высокого пространственного разрешения для регистрации частиц высоких энергий в стволах ШАЛ, сцинтилляционных детекторов больших площадей для измерения заряженной компоненты вблизи максимума ШАЛ, а также детекторов мюонов и черенковского излучения, позволит получить уникальную информацию как о характеристиках адрон-ядерных взаимодействий, так и об астрофизических аспектах частиц ПКИ.

Изучение ШАЛ невозможно проводить без интенсивного моделирования процессов развития ливней в атмосфере и отклика детекторов. При этом необходимо будет делать основной упор на моделировании отклика применяемых детекторов, поскольку уже существуют широко используемые в мире пакеты для моделирования ШАЛ (CORSIKA, например). Однако следует заметить, что для изучения компланарности наиболее энергичных подстволов в стволах ШАЛ необходимо будет включать в стандартные пакеты моделирования ШАЛ соответствующие новые модели адронных взаимодействий.

В связи со всем вышеизложенным ИЯИ РАН, имеющему большой научный потенциал в изучении ШАЛ и астрофизических аспектов космических лучей целесообразно принять участие в вышеописанных высокогорных экспериментах. Данные исследования позволят привлечь молодежь, стимулируют разработки новых детекторов для регистрации различного вида космического излучения.

3. Краткое обоснование новизны

Предполагается разработка уникальных высокогорных комплексных установок по изучению ШАЛ, включающих такие новейшие элементы, как ионизационно-нейтронные калориметры и детекторы высокого пространственного разрешения для изучения стволов ШАЛ.

4. Обоснование предлагаемого решения задачи.

В настоящее время имеется задел по данной проблеме. Совместно с ФИАН ИЯИ РАН принимает участие в разработке концепция ионизационно-нейтронного калориметра для исследования частиц высоких энергий. Проводились тестовые эксперименты по облучению прототипов прибора адронами и электронами. Совместно с ФИАН и ИФВЭ (Протвино) разрабатываются сцинтилляторы новых типов. Разрабатывается адекватная модель компланарной генерации вторичных частиц во фрагментационной кинематической области при сверхвысоких энергиях в адронных взаимодействиях.

5. Основные этапы работы и планируемые результаты. Содержание намеченной на предстоящий год работы

В ходе выполнения проекта будет разработана концепция и созданы элементы высокогорных комплексных установок по изучению ШАЛ, включающих ионизационно-нейтронные калориметры, детекторы для изучения стволов ШАЛ для прямых измерений состава и спектра частиц ПКИ в области 10^{15} - 10^{16} эВ; разработаны феноменологические модели компланарной генерации частиц, затем включенные в один из пакетов моделирования ШАЛ

Первый этап – отработка методики и проведение вычислений.

Второй этап – разработка и создание элементов прототипов элементов высокогорных комплексных установок.

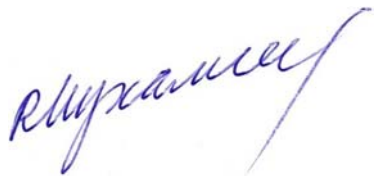
Третий этап – начало создания высокогорных комплексных установок.

В 2010 г. предполагается провести отработку методики и проведение вычислений.

6. Практическая значимость планируемых результатов, возможные области применения

На основе полученных результатов можно будет создать не имеющие аналогов высокогорные комплексные системы детекторов компонент ШАЛ, позволяющие получить разнообразную и уникальную информацию как о характеристиках взаимодействий адронов сверхвысоких энергий, так и свойствах ПКИ при энергиях $10^{15} - 10^{18}$ эВ, включая особую область «колена», что будет иметь очень большое значение для астрофизики и, возможно, для физики элементарных частиц.

Руководитель темы



Р.А.Мухамедшин

Зав. ОЛВЭНА



Г.Т.Зацепин