

Исследования по физике космических лучей являются одним из ведущих направлений в НИИЯФ МГУ. Основы этого направления были заложены Д.В. Скобельцыным и С.Н. Верновым, по инициативе которых было развернуто систематическое изучение как характеристик первичных космических лучей (ПКЛ) – их происхождения и механизмов ускорения, энергетических спектров, зарядового состава, анизотропии (астрофизический аспект), так и характеристик их взаимодействий (ядерно-физический аспект).

Ранее астрофизический аспект называли космофизическим, однако представляется, что термин «астрофизический» более точно отвечает данной проблематике, тогда как термин «космофизический» более уместен для обозначения исследований, цель которых связана с изучением ближайшей к Земле области космического пространства и процессов, в ней происходящих. Проблемы солнечных космических лучей (см. статью М.И. Панасюка в настоящем издании) принято отделять от астрофизического аспекта физики космических лучей, хотя такое разделение и является несколько искусственным. За 60 лет существования НИИЯФ МГУ его сотрудниками был получен целый ряд результатов мирового уровня, имевших первостепенное значение для физики космических лучей и во многом определивших ее развитие. История этих исследований вплоть до 1997 г. с большой полнотой изложена в обзоре В.И. Зацепина, Г.В. Куликова и Ю.А. Фомина, изданном в НИИЯФ МГУ в 1998 г., поэтому в настоящей работе основное внимание уделено результатам последних 10 лет. В дальнейшем речь будет идти о ПКЛ с энергией, превосходящей 10 ГэВ/нуклон, когда можно пренебречь как вкладом частиц, генерируемых на Солнце, так и влиянием магнитных полей Солнца и Земли на интенсивность космических лучей.

Хотя, в основном, в статье рассматривается астрофизический аспект физики космических лучей, автор счёл полезным остановиться также на вопросах, относящихся к ядерно-физическому аспекту. Внимание уделено и экспериментам по исследованию нейтрино, в которых участвует НИИЯФ МГУ, поскольку их связь с изучением обычных космических лучей представляется несомненной.

Традиционное деление исследований космических лучей на астрофизический и ядерно-физический аспекты нельзя считать абсолютным (хотя бы уже потому, что регистрация частиц каким-либо детектором невозможна без знания того, как частица взаимодействует с веществом). Следует отметить, что значение астрофизического аспекта постепенно становится всё более существенным. Это обусловлено успехами ускорительной техники, лишившими, по сути, космические лучи той роли источника частиц высоких энергий, которую космические лучи играли длительное время. Конечно, в

потоке космических лучей существуют частицы с энергией, превосходящей на много порядков энергию, достигнутую к настоящему времени ускорителями. Однако интенсивность потока частиц таких энергий очень низка, что не позволяет использовать их для исследования взаимодействий протонов и ядер с веществом в прямых экспериментах, когда заряд и энергия (или импульс) частиц измеряются непосредственно.

Сказанное, разумеется, не отрицает большой ценности информации, которую можно извлечь, изучая взаимодействия при сверхвысоких энергиях, пока ещё недоступных ускорителям, косвенными методами, например, путём регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Однако надо помнить, что астрофизические исследования в области сверхвысоких энергий требуют определённых предположений о том, как происходят адронные взаимодействия. Такие предположения реализуются в виде феноменологических моделей, параметры которых определяются из ускорительных данных. Это вносит дополнительную неопределённость в интерпретацию результатов, полученных в экспериментах с космическими лучами сверхвысоких энергий, поскольку модельные представления приходится экстраполировать за пределы той области, где они надёжно оттестированы.

1. Прямые эксперименты по исследованию спектра и состава ПКЛ

Наиболее точным прибором для измерения энергии частиц в области высоких энергий является ионизационный калориметр, созданный учеными НИИЯФ МГУ (Н.Л. Григоров, В.С. Мурзин, И.Д. Рапопорт, 1957). Этот прибор, впервые применённый именно в исследованиях по физике космических лучей, активно используется в различных модификациях для изучения ПКЛ. Впервые измерение химического состава и парциальных энергетических спектров космических лучей в широкой области энергий с помощью ионизационного калориметра было реализовано в 1965–1968 гг. на спутниках «ПРОТОН-1, 2, 3» (до 10^{14} эВ) и «ПРОТОН-4» (до 10^{15} эВ). В этих экспериментах получен спектр всех частиц при энергиях от 10^{11} эВ до $2 \cdot 10^{15}$ эВ (Н.Л. Григоров, В.Е. Нестеров, И.Д. Рапопорт и др., 1967, 1971), который уже почти 40 лет широко цитируется в литературе, причём достигнутая энергия и статистическая обеспеченность спектра всех частиц остаются рекордными для прямых экспериментов. К сожалению, измерить химический состав с достаточной точностью в этих экспериментах не удалось из-за искажения сигнала от первичной частицы в зарядовом блоке альбедными частицами из калориметра. Поэтому указания на больший показатель спектра протонов по сравнению со спектром всех частиц при энергиях выше 10^{12} эВ не могли считаться бесспорными.

Следующие попытки измерить химический состав были предприняты на спутниках «СОКОЛ-1» и «СОКОЛ-2» (Н.Л. Григоров, И.П. Иваненко, И.Д. Рапопорт и др., 1984–1986). В этих экспериментах использовался калориметр толщиной около 6 ядерных пробегов, содержащий 10 слоёв секционированных сцинтилляторов. В качестве детекторов для определения заряда легких ядер (протонов, ядер гелия) использовались направленные черенковские счетчики, благодаря чему удалось устранить влияние альбедных частиц. Для определения заряда других ядер использовался тонкий секционированный ненаправленный черенковский детектор. Были измерены спектры протонов, ядер гелия и более тяжелых ядер в области энергий от 2 до 100 ТэВ. Однако ограниченное время экспозиции не позволило получить достаточный статистический материал для решения проблемы протонного спектра.

В 1960-х годах для исследования энергетических спектров и взаимодействий частиц в области энергий больше 1 ТэВ стали применять рентгеноэмульсионные камеры (РЭК), которые можно рассматривать как пассивные калориметры, интегрально регистрирующие события без разрешения во времени. Эта методика нашла широкое применение. В НИИЯФ МГУ под руководством Г.Т. Зацепина и И.В. Ракобольской в

1968 г. была создана крупномасштабная подземная установка из глубоких свинцовых камер для измерения зенитно-углового и энергетического распределений мюонов с энергией выше 2 ТэВ, а в 1971 г. возникла коллаборация ПАМИР, в работе которой НИИЯФ МГУ принял самое активное участие.

Модернизированная рентгеноэмульсионная техника была использована также для исследования зарядового состава ПКЛ (В.И. Зацепин и др., 1975–1987). В серии из 8-ми баллонных полетов на высотах 32 км экспонировались эмульсионные камеры, содержавшие, наряду с рентгеновскими пленками для измерения энергии, дополнительные слои ядерных эмульсий для измерения заряда первичных ядер (эксперимент MUBEE). В течение 860-часовой экспозиции удалось зарегистрировать более 800 каскадов, образованных первичными частицами с энергией больше 10 ТэВ, что позволило измерить их энергетические спектры в диапазоне энергий 10 ТэВ – 100 ТэВ. В этой серии экспериментов, как и ранее на спутниках серии «ПРОТОН», было получено указание на различие показателей степени спектров протонов и ядер с $Z > 2$.

В 1995–1999 гг. НИИЯФ МГУ совместно с Физическим институтом РАН провёл серию экспозиций рентгеноэмульсионных камер новой конструкции в рамках совместного Российско–японского проекта RUNJOB, цель которого состояла в изучении зарядового состава и энергетических спектров ПКЛ в области энергий от 10 ТэВ до нескольких сотен ТэВ. (Г.Т. Зацепин, И.В. Ракобольская, Т.М. Роганова, Л.Г. Свешникова, И.В. Яшин и др.).

Камера площадью $0,4 \text{ м}^2$ состояла из мишени (где происходило взаимодействие частиц), спейсера (блока легкого вещества, предназначенного для увеличения расхождения вторичных частиц), тонкого свинцового калориметра и диффузера (блока легкого вещества для регистрации продолжения каскадной кривой после выхода из калориметра).

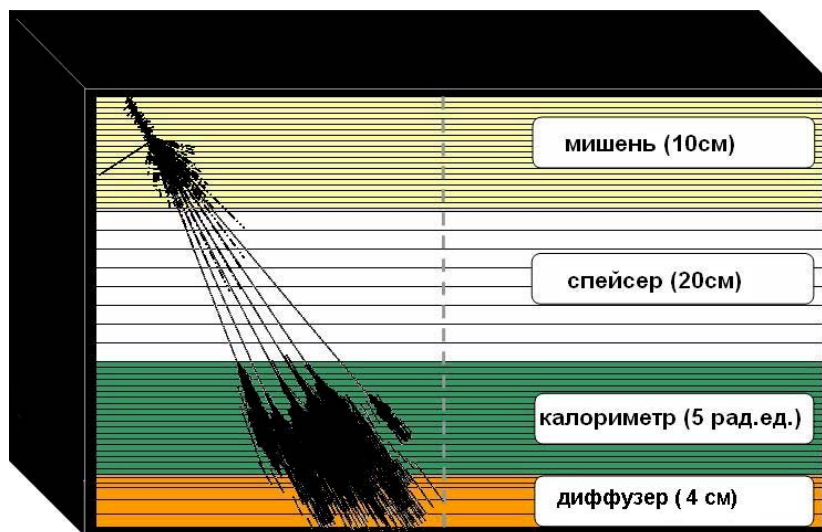


Рис 1. Рентгеноэмульсионная камера эксперимента RUNJOB.

Было выполнено 10 полётов на баллонах от Камчатки до бассейна Волги на высоте 28–34 км. Полная экспозиция составила $575 \text{ м}^2 \cdot \text{час}$. Обработка и анализ данных проводились и проводится параллельно в России и Японии по скоординированной программе. Для более точного определения энергии были применены методы, основанные на измерении углов вылета фрагментов ядро-ядерных взаимодействий и пионов в протон-ядерных взаимодействиях. В настоящее время завершена обработка 90% имеющейся статистики эксперимента. Получены спектры протонов, ядер гелия, ядер групп CNO, Ne-Mg-Si, железа и спектры всех частиц. Наклоны спектров протонов и ядер гелия не

различаются значимо с учетом статистических ошибок. Спектр протонов в области 10^{13} – 10^{15} эВ хорошо согласуется с данными прямых экспериментов JACEE и СОКОЛ. Интенсивности ядер гелия, групп CNO, Ne-Mg-Si и железа, а также спектра всех частиц оказались несколько ниже интенсивностей, полученных в экспериментах JACEE, СОКОЛ и ПРОТОН.

Принципиальным недостатком эмульсионных экспериментов является высокий энергетический порог в рентгеноэмульсионных камерах. В связи с этим в НИИЯФ МГУ были начаты новые эксперименты с использованием тонких калориметров с электронным съемом информации, первый из которых был проведен в 1994 г. совместно с учеными США. В нём использовался тонкий ионизационный калориметр (ТИК) без детектора заряда, и цель эксперимента состояла в измерении спектра всех частиц в области энергий от 100 ГэВ до 100 ТэВ. В течение 76 часов полета на высоте 36 км было зарегистрировано $1,9 \cdot 10^6$ первичных частиц, выделивших в приборе энергию более 12 ГэВ, что дало возможность построить спектр энерговыделений в энергетической области от 30 ГэВ до 30 ТэВ. Анализ полученных данных позволил заключить, что спектр всех частиц не описывается в рамках предположения о том, что все его компоненты в области высоких энергий имеют один и тот же наклон (Дж. Адамс, Дж. Ли, В.И. Зацепин, М.И. Панасюк, Н.В. Сокольская, 1996).



Рис. 2. Прибор АТИК в Антарктиде

Следующий шаг – создание прибора, регистрирующего не только энергию частицы, но и её заряд (проект АТИК) – выполняется НИИЯФ МГУ (В.И. Зацепин и др.) в коллаборации с учёными США, Южной Кореи и Германии. Цель проекта АТИК – получение методически надежных и статистически обеспеченных экспериментальных данных об энергетических спектрах ядер от протонов до железа в широком энергетическом интервале $5 \cdot 10^{10}$ – 10^{14} эВ. За период 2000–2004 гг. совершено две стратосферных экспозиции (16 и 20 суток) в околуполусных аэростатных полетах со станции Мак-Мёрдо в Антарктиде на высоте 36 км. Проведенная обработка экспериментальных данных дала возможность получить из спектров энерговыделений в калориметре энергетические спектры протонов и ядер гелия. При использовании для описания этих спектров степенных аппроксимаций в области выше 100 ГэВ/нуклон показатель спектра протонов превышает показатель спектра ядер гелия на 0,104, причем

на уровне значимости 12 среднеквадратичных ошибок. Сравнение экспериментальных результатов с ожидаемыми спектрами в рамках модели распространения космических лучей в Галактике – Leaky Box – показало, что наилучшее согласие достигается в предположении, что распределение магнитных неоднородностей в Галактике соответствует спектру Колмогорова. Кроме того, важную роль играет доускорение частиц малых энергий в процессе их распространения, а показатели спектров протонов и ядер гелия в источниках различаются на 0,1.

2. Исследования ПКЛ в области сверхвысоких энергий методом ШАЛ (астрофизический аспект)

Прошедшее десятилетие ознаменовалось значительным усилением интереса к проблеме выяснения природы излома в энергетическом спектре ПКЛ при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ, обнаруженного сотрудниками НИИЯФ МГУ (Г.Б. Христиансен, Г.В. Куликов, 1958) и зарегистрированного в качестве открытия (авторы открытия С.Н. Вернов, Г.Б. Христиансен, Г.В. Куликов, В.И. Соловьёва, А.Т. Абросимов, Б.А. Хренов, 1970).



Рис. 3. Авторы открытия (слева направо) Б.А. Хренов, В.И. Соловьёва, Г.В. Куликов, А.Т. Абросимов, С.Н. Вернов, Г.Б. Христиансен

Исследования в этой традиционной для института области продолжались и в течение последних лет.

В 2000 г. началась эксплуатация установки «ТУНКА-25» (Л.А. Кузьмичев, В.В. Просин, И.В. Яшин и др.), предназначенной для детального исследования энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в диапазоне энергий 10^{14} – 10^{17} эВ путём регистрации черенковского излучения ШАЛ. Установка расположена в Тункинской долине (150 км от Иркутска) на полигоне Иркутского госуниверситета. К настоящему времени установка имеет площадь около $0,1 \text{ км}^2$ и состоит из 25 оптических детекторов на базе фотоприемника Квазар-370, предназначенных для регистрации черенковского излучения, и четырех детекторов на базе ФЭУ D668 (Топ-ЕМ1), предназначенных для изучения формы импульса этого излучения. Идея использования формы черенковского импульса для анализа продольного развития ШАЛ предложена в НИИЯФ МГУ (Г.Б. Христиансен, Ю.А. Фомин, 1971) и впервые

реализована на Якутской установке ШАЛ. Совместная информация о функции пространственного распределения черенковского света и длительности импульса на большом (200–300 м) расстоянии от оси ливня существенно улучшает возможности установки для исследования состава ПКЛ. Для обеспечения сравнения с данными об энергетическом спектре и массовом составе ПКЛ, полученными прямыми методами (см. предыдущий раздел), энергетический порог регистрации ливней был уменьшен за счет применения специальных мер. Использование черенковской методики позволяет получить результаты, модельная зависимость которых является минимальной, поскольку черенковское излучение собирается со всего пути, пройденного заряженными частицами ШАЛ в атмосфере, играющей роль своего рода калориметра. Оценка погрешности определения энергии составляет 12% для диапазона энергий 10^{15} – $2 \cdot 10^{16}$ эВ и зенитных углов от 0 до 25° .

Массовый состав ПКЛ определяется по результатам измерения глубин максимумов развития ШАЛ, поскольку при заданной энергии глубина логарифмически зависит от массы ядра, породившего ливень. Точность определения глубины максимума составляет около 30 г/см^2 . В результате работы установки получен дифференциальный энергетический спектр ПКЛ в области энергий от $5 \cdot 10^{14}$ до 10^{17} эВ. Спектр имеет резкий излом при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ. До излома спектр описывается степенной функцией с показателем $2,71 \pm 0,01$ (стат.) $\pm 0,05$ (сист.). При энергии выше $6 \cdot 10^{15}$ эВ показатель спектра становится равным $3,22 \pm 0,03$ (стат.) $\pm 0,05$ (сист.). Полученные результаты хорошо согласуются с данными как установки ШАЛ МГУ, так и последних измерений, выполненных на установках KASCADE и TIBET. По данным о глубинах максимума ливня наблюдается слабое облегчение массового состава ПКЛ в области 10^{15} – 10^{16} эВ. Средний логарифм массового числа ($\langle \ln A \rangle$) в этой области энергий примерно равен 1,75. При дальнейшем росте энергии наблюдается быстрое утяжеление состава. Утяжеление состава при энергиях выше 10^{16} эВ наблюдается практически во всех экспериментах, однако разброс в данных очень велик. Результаты установки «ТУНКА» наиболее близки к данным установки KASCADE.

В 2004 году на установке «ТУНКА» введен в эксплуатацию первый водный черенковский детектор для регистрации заряженных частиц и гамма-квантов в составе ШАЛ. Детектор имеет площадь около 10 м^2 и высоту 1 м. При энергии выше 10^{16} эВ совместная работа установки «ТУНКА» и водных черенковских детекторов позволит существенно уточнить поведение массового состава ПКЛ. Начаты подготовительные работы по созданию установки «ТУНКА-133», которая будет содержать на площади 1 км^2 133 оптических детектора на базе ФЭУ ЕМІ9350. Энергетический порог установки 10^{15} эВ. Ранее не существовало черенковской установки такой площади и с таким низким энергетическим порогом. Новая установка позволит исследовать ПКЛ вплоть до 10^{18} эВ, т.е. осуществлять поиск возможного предела ускорения космических лучей галактическими источниками.

Бурный прогресс вычислительной техники, свидетелями которого мы являемся, дает возможность значительно усовершенствовать (по существу, поднять на новый, недоступный ранее уровень) как процедуру обработки экспериментальных данных установок для исследования ШАЛ, так и процесс сопоставления экспериментальных результатов с предсказаниями теоретических моделей. Поэтому в прошедшем десятилетии продолжался анализ результатов, полученных в 1984–1990 гг. на старейшей экспериментальной установке НИИЯФ для исследования космических лучей сверхвысоких энергий – установке ШАЛ МГУ. Эта установка, созданная в 1950-х годах и модернизированная в конце 1970-х, была одной из самых информативных в мире, и даже в настоящее время некоторые ее результаты (в частности, распределения по числу мюонов при фиксированном числе электронов, относящиеся к области первичных энергий выше 10^{17} эВ) продолжают оставаться уникальными.

Разработан улучшенный метод определения массового состава ПКЛ при энергиях 10^{15} – 10^{17} эВ по экспериментальным данным установки ШАЛ МГУ. В этом методе наряду с флуктуациями в числе мюонов, регистрируемых подземным детектором, учтены флуктуации градиента функции пространственного распределения заряженных частиц на фиксированных расстояниях от оси ливня. Результаты на более высоком методическом уровне подтверждают предыдущее заключение относительно обогащения состава тяжелыми ядрами за изломом при энергиях $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ в энергетическом спектре ПКЛ (Г.Б. Христиансен, О.В. Веденеев, Н.Н. Калмыков, Г.В. Куликов, В.П. Сулаков, Ю.А. Фомин и др.)

Проведен анализ экспериментальных данных, полученных с большой статистикой на установке ШАЛ МГУ за период 1984–1990 гг. и соответствующих ливням с энергией выше 10^{17} эВ. Для таких ливней на установке имеются данные четырёх подземных детекторов, регистрирующих мюоны с энергией более 10 ГэВ, что позволило построить индивидуальные функции пространственного распределения мюонов. Использование индивидуальных плотностей мюонов с методической точки зрения предпочтительнее, поскольку при этом уменьшается зависимость результатов анализа от вида функции пространственного распределения мюонов. Новые данные по мюонной компоненте ШАЛ подтверждают заключение об утяжелении состава ПКЛ в области за изломом.

По данным установки ШАЛ МГУ с использованием современных кварк-глюонных моделей определен энергетический спектр ПКЛ путем пересчета от спектров ШАЛ по числу электронов и по числу мюонов с энергией выше 10 ГэВ. Результаты пересчета хорошо согласуются с энергетическим спектром, полученным на установке «ГУНКА» с применением черенковской методики. Величина изменения показателя энергетического спектра при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ соответствует общепринятым представлениям ($\Delta\gamma = 0,4$ – $0,5$).

Следует специально остановиться на вопросе о том, насколько хорошо спектр ПКЛ, восстановленный по данным ШАЛ, согласуется с результатами прямых экспериментов. К сожалению, совокупность данных прямых измерений, экстраполированная к энергии 10^{15} эВ, даёт интенсивность спектра всех частиц несколько меньшую (примерно на 15–20%), чем данные ШАЛ. Задача прецизионного определения массового состава в области сверхвысоких энергий ещё далека от окончательного решения, и достаточно надёжным представляется лишь вывод об утяжелении состава в области за изломом.

Значительный интерес представляет изучение распределения времён прихода ШАЛ. С этой целью было проанализировано около двух миллионов ШАЛ с энергией выше 10^{14} эВ, зарегистрированных на модернизированной части установки ШАЛ МГУ. Исследование распределений времён прихода ливней дало возможность обнаружить новые закономерности генерации космических частиц сверхвысоких энергий (М.Ю. Зотов, Г.В. Куликов, Ю.А. Фомин). Показано существование кластеров ШАЛ с числом частиц порядка 10^5 , в которых наблюдается значительное возрастание темпа счета по сравнению со средним. Обработка зарегистрированных кластеров методами нелинейного анализа, а также методами классической статистики даёт указание на существование признаков хаотической динамики в распределениях времен прихода ливней. Вероятность случайного возникновения такого результата $\sim 10^{-7}$ – 10^{-8} . Качественно продемонстрировано, что наблюдаемые всплески темпа счета ливней связаны с неоднородностями и фрактальными свойствами межпланетного магнитного поля.

3. Исследования взаимодействий космических лучей

Выше уже отмечалось, что ПКЛ, если рассматривать их как источник частиц сверхвысоких энергий, не могут удовлетворять требованиям, предъявляемым к ускорительным пучкам. Поэтому заключения о характеристиках взаимодействий, извлекаемые из исследований, проводимых с космическими лучами, оказываются, как правило, не столь определёнными, как полученные в результате ускорительных экспериментов. Но в то же время, только ПКЛ сверхвысоких энергий дают возможность изучать взаимодействия при энергиях, превосходящих достигнутые на ускорителях.

В течение последнего десятилетия продолжался анализ данных эксперимента ПАМИР, накопленных более чем за 20-летний период экспозиции ретнгноэмulsionных камер различной конструкции на Памире на высоте 4 400 м над уровнем моря. Этот крупномасштабный эксперимент по изучению взаимодействий адронов космических лучей при энергиях 100 ТэВ – 100 ПэВ был начат в 1971 г. коллаборацией 11-ти советских и польских институтов. В работе с самого начала принимали участие сотрудники НИИЯФ (И.П. Иваненко, И.В. Ракобольская, А.К. Манагадзе, Е.А. Мурзина, Т.М. Роганова, Л.Г. Свешникова и др.). В широком диапазоне энергий исследовались пространственные и энергетические характеристики гамма-адронных семейств, т.е. генеалогически связанных каскадов вторичных частиц космических лучей, рождённых во взаимодействиях адронов с ядрами атомов воздуха.

Проведенный анализ показал, что происходит резкое увеличение ширины пространственного распределения гамма-квантов в семействах при переходе к энергиям выше $2 \cdot 10^{16}$ эВ по сравнению с ожидаемой из расчетов. Такой же вывод следует из анализа адронных семейств. Наблюдаемое расширение пространственного распределения указывает либо на значительное увеличение поперечного импульса частиц в ядерном взаимодействии, либо на изменение массового состава частиц первичного космического излучения. Возможна и комбинация этих двух механизмов.

Одним из наиболее интересных результатов, полученных в эксперименте ПАМИР, является наблюдаемый в семействах с энерговыделением более 500 ТэВ эффект выстроенности наиболее энергичных частиц вдоль прямой, ортогональной направлению движения первичной частицы. Этот эффект выходит за рамки статистических флуктуаций и не находит количественного объяснения ни в одной современной модели. При росте энерговыделения происходит не только расширение пространственного распределения, но и увеличение доли выстроенных семейств.

Исключая эффект выстроенности, можно констатировать, что данные, полученные при исследовании семейств гамма-квантов и адронов, равно как и экспериментальные результаты изучения ШАЛ могут быть адекватно описаны в рамках современной кварк-глюонной картины сильных взаимодействий. В этой связи следует упомянуть созданную в НИИЯФ МГУ модель адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий QGSJET, на основе которой был создан соответствующий монте-карловский генератор этих взаимодействий (Н.Н. Калмыков, С.С. Остапченко, 1995–1997). Модель QGSJET учитывает как мягкие, так и жёсткие взаимодействия, а также процесс фрагментации ядер. Этот генератор, оказавшийся удобным инструментом для проведения расчетов, необходимых для интерпретации и планирования экспериментов с космическими лучами сверхвысоких энергий, в настоящее время широко используется во всем мире и входит в состав известных программных комплексов CORSIKA и AIRES.

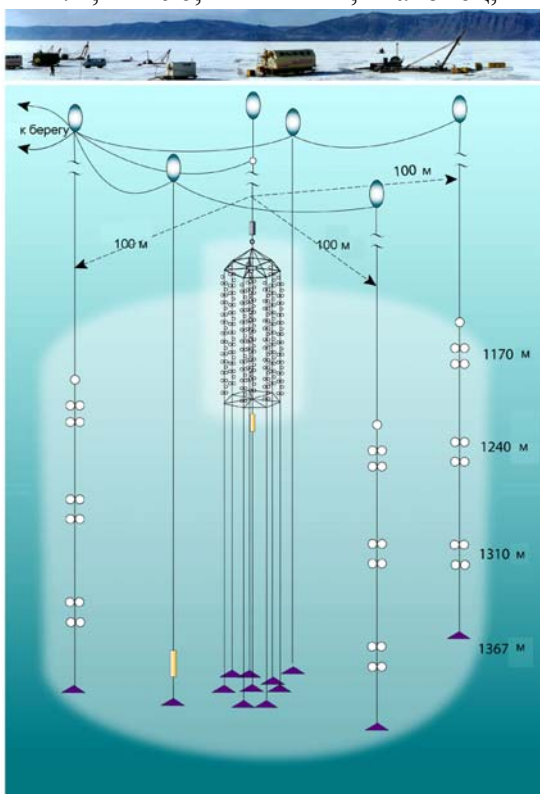
Анализ данных космических лучей сверхвысоких энергий позволяет отвергнуть ту или иную конкретную модель взаимодействия, если она противоречит эксперименту. Однако удовлетворительное согласие модели с экспериментальными данными ещё не является гарантией её истинности, поскольку, в принципе, нельзя исключить, что такого же (или даже лучшего) согласия можно достичь в рамках другой модели. Поэтому следует считаться с возможностью изменения модели (или её отдельных параметров) по мере

накопления экспериментальных данных. В частности, такой пересмотр может стать необходимым, если в результате запуска LHC коллайдера наши представления о том, как происходят сильные взаимодействия, существенно изменятся.

4. Глубоководная регистрация мюонов и нейтрино

В 1980 г. ИЯИ АН СССР инициировал работы по созданию на озере Байкал глубоководных черенковских установок для исследования потоков мюонов и нейтрино. В НИИЯФ МГУ по указанию С.Н. Вернова в 1981 г. для участия в этих работах была образована группа под руководством Л.А. Кузьмичева. Выбор озера Байкал обусловлен рядом преимуществ, облегчающих проведение эксперимента по сравнению с осуществлением аналогичных проектов в океане, а именно: наличием больших глубин вблизи от берега, малостью поглощения и рассеяния света в Байкальской воде, устойчивым ледовым покровом в течение приблизительно 8 недель. В 1982 г. в работу включилась одна из лабораторий НИИПФ Иркутского государственного университета, и возникло сотрудничество БАЙКАЛ, к которому в дальнейшем присоединились Нижегородский государственный технический университет и Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, а также группа физиков из Германии.

Создание нейтринного телескопа НТ200 происходило поэтапно. С 1993 г. действовали 3 гирлянды, состоящие из 36 модулей, – НТ36, затем возникли установки НТ72, НТ96, НТ144 и, наконец, в 1998 г. заработал полномасштабный нейтринный телескоп НТ200.



НИИЯФ МГУ, являясь соисполнителем проекта по созданию НТ200, ведёт работу по созданию подводной электроники детектора, системы сбора и передачи данных. Сотрудники НИИЯФ МГУ принимают участие в монтаже нейтринных телескопов непосредственно на озере Байкал, обслуживают стационарно работающие в течение года прототипы НТ200. В 1997 г. сотрудниками НИИЯФ МГУ (С.Ф. Бережнев и др.) на берегу Байкала установлена антенна и комплекс оборудования, обеспечивающий подключение Байкальского нейтринного стационара Института ядерных исследований к системе Интернет. Зарегистрировано 800 ливневых событий, в которых удалось восстановить положение оси ливня и число электронов. Анализ результатов этого эксперимента продолжается. Банк данных содержит в настоящее время около 400 нейтринных событий.

Рис. 4. Схема нейтринного телескопа

В 2003–2005 гг. проведены работы по разворачиванию нейтринного телескопа НТ200+, являющегося модификацией телескопа НТ200. Новая установка позволяет при сравнительно небольшом увеличении общего числа оптических модулей повысить эффективный объём для регистрации высокоэнергичных нейтрино до $\sim 10^7 \text{ м}^3$. Такой

объем достигается за счет постановки трех внешних гирлянд на расстоянии 100 м от телескопа НТ200.

За период эксплуатации нейтринного телескопа коллаборацией БАЙКАЛ при участии сотрудников НИИЯФ МГУ (Л.А. Кузьмичёв, Э.А. Осипова, Е.Г. Попова, В.В. Просин, И.В. Яшин и др.) получены следующие научные результаты: наиболее сильное в настоящее время ограничение на

диффузный поток нейтрино в диапазоне энергий 20 ТэВ – 50 ПэВ ($E^2 \Phi_\nu(E) \leq 8,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ ГэВ}$) и ограничение на поток релятивистских монополей ($\Phi(E) \leq 0,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$), являющееся одним из самых сильных пределов на существование релятивистских монополей.

Отметим, кроме того, ограничение на потоки мюонов прямой генерации в области энергий $3,2 \cdot 10^4 - 1,6 \cdot 10^6 \text{ ГэВ}$, а также ограничение на гипотетическую мюонную компоненту в области энергий $6 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^6 \text{ ГэВ}$, которая вводится в некоторых моделях при попытке объяснения излома в спектре ПКЛ за счет новых гипотетических взаимодействий.

5. Проекты новых экспериментов

НИИЯФ МГУ принимает участие в подготовке ряда экспериментов, связанных с различными аспектами физики космических лучей. В настоящем разделе



Рис. 5. Детекторный пункт модернизируемой установки ШАЛ МГУ

рассматриваются проекты, работа над которыми продвинулась достаточно далеко и в реализации которых роль института является определяющей.

Применение ионизационного калориметра для исследования прямыми методами энергетического спектра и состава ПКЛ при всех неоспоримых достоинствах имеет существенный недостаток, связанный с необходимостью вывода на орбиту большого количества плотного вещества, если эксперимент нацелен на область энергий выше 10^{14} эВ . В НИИЯФ МГУ разработана новая методика KLEM (Kinematic Lightweight Energy Meter), состоящая в том, что энергия первичной частицы определяется из пространственной плотности распределения потока вторичных частиц, рожденных в тонкой мишени в первом акте неупругого взаимодействия и размноженных в вольфрамовом конверторе. Эта методика, на основе которой осуществляется проект эксперимента НУКЛОН, позволяет отказаться от массивного поглотителя и, таким образом, дает возможность создания научной аппаратуры небольшого веса при значительной величине светосилы. Проект НУКЛОН получил поддержку РАН и включен в Федеральную космическую программу

России. НИИЯФ МГУ (А.Г. Воронин, М.М. Меркин, Д.М. Подорожный, Л.Г. Свешникова, А.Н. Турундаевский) – головная организация по созданию научной аппаратуры эксперимента НУКЛОН, а ФГУП КБ Арсенал им. М.В. Фрунзе – головная организация по созданию научно-технических средств для проведения космического эксперимента. Кроме того, в эксперименте принимают участие ОИЯИ, НПП Горизонт, АОЗТ НИИМВ и МГИФИ.

Эксперимент предполагает создание научной аппаратуры небольших габаритов и веса, способной давать сведения о ПКЛ в широком диапазоне энергий 10^{11} – 10^{15} эВ. Научная аппаратура представляет собой «слоистую» структуру весом менее 165 кг при размерах активной части спектрометра $\sim 500 \times 500 \times 250$ мм³ и включает 4 слоя падовых (размер пада $\sim 2,5$ см²) кремниевых детекторов, предназначенных для прецизионного измерения заряда первичной частицы; 6 слоев микростриповых кремниевых детекторов (шаг стрипа ~ 450 мкм), предназначенных для определения энергии первичной частицы, локализации места первого неупругого взаимодействия и траектории прихода в установку первичной частицы; 6 слоев позиционно чувствительных сцинтилляционных детекторов, предназначенных для выработки триггерного сигнала. Энергопотребление не превышает 150 Вт, а собственно научной аппаратуры – 120 Вт. Аппаратура должна сохранять работоспособность в течение не менее 5 лет.

Планируемый фактор экспозиции эксперимента НУКЛОН почти в 10 раз превышает суммарный фактор экспозиции, достигнутый за 40 лет исследований в других экспериментах. Эксперимент позволит осуществить исследование энергетических спектров различных элементов ПКЛ в области энергий 1–1000 ТэВ, проверить наличие неоднородностей в этих спектрах, исследовать возможную пространственную анизотропию отдельных групп ядер, что существенно для теории происхождения ПКЛ. Ожидаемое время начала эксперимента НУКЛОН – 2008 г.

Переходя к рассмотрению более высоких энергий, отметим, что до настоящего времени остаётся актуальной проблема реликтового обрезания спектра ПКЛ предельно высоких энергий, поставленная еще в 1968 г. К. Грейзенем, Г.Т. Зацепиным и В.А. Кузьминым. Как известно, эффект обрезания спектра ожидается при энергиях выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ и, в то же время, на ряде установок получены данные о существовании частиц с энергией более 10^{20} эВ, что ставит вопрос о необычном происхождении таких частиц.

Наблюдение частиц столь высоких энергий может быть объяснено либо существованием новых астрофизических объектов – ускорителей заряженных частиц, находящихся в Галактике или в галактиках, принадлежащих местному скоплению (расстояния не далее 50 Мпк), либо гипотетическими распадами частиц, возникающих в моделях великого объединения, или топологических дефектов, рассматриваемых в космологической теории.

К концу 1980-х годов стало очевидно, что существовавшая в то время мировая сеть ливневых установок с площадями порядка десятков квадратных километров оказалась неспособной разобраться с противоречиями между данными различных групп. В связи с

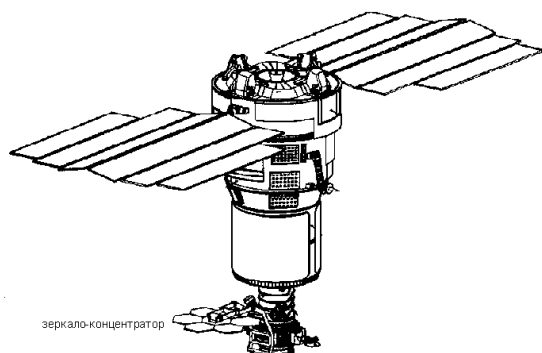


Рис. 6. Схематическое изображение детектора ТУС на МКС.

этим с 1987 г. в рамках Государственной программы «Физика высоких энергий» было начато проектирование и создание новой установки площадью 1000 км² (ШАЛ-1000) для исследования космических лучей предельно высоких энергий – 10¹⁹–10²¹ эВ. У истоков этой работы стояли Г.Т. Зацепин, М.А. Марков, А.Е. Чудаков. Организатором и руководителем работ по проекту ШАЛ-1000, выполнение которого было поручено

НИИЯФ МГУ, стал Г.Б. Христиансен, а новую установку планировалось создать в Казахстане. К сожалению, распад СССР и недостаточное финансирование сделали невозможным реализацию этого проекта, который был задуман и начал осуществляться значительно раньше, чем стартовавший в 1995 г. проект Pierre Auger Observatory. Однако методические разработки и материальная база, возникшие в период работы над проектом ШАЛ-1000, используются для создания научно-учебного комплекса на базе модернизируемой в настоящее время установки ШАЛ МГУ (О.В. Веденеев, Н.Н. Калмыков, Л.А. Кузьмичев, Г.В. Куликов, В.П. Сулаков, Ю.А. Фомин и др.). Модернизация включает переход к современной электронике и оптоволоконной связи между детекторами и центром установки. Установка предназначена для исследований в области энергий 1014–1017 эВ.

В то же время не забыта исходная задача проекта ШАЛ-1000 – исследование космических лучей предельно высоких энергий. Этой цели посвящен проект ТУС (трековая установка), развивающийся в НИИЯФ МГУ с 1995 г. (Б.А. Хренов, Г.К. Гарипов, И.В. Яшин и др.). Проект ТУС, как и проект НУКЛОН, входит в Федеральную космическую программу России и предусматривает изучение энергетического спектра космических лучей при энергиях выше 1019 эВ с помощью оптического детектора, размещаемого на борту космического аппарата. Наблюдение флуоресцентных треков, создаваемых ШАЛ, с орбиты оказывается более эффективным, чем наблюдение с помощью наземных установок для изучения ШАЛ. Один орбитальный оптический детектор может просматривать огромные площади атмосферы Земли. Предлагаемый оптический детектор ТУС будет первым прибором такого типа. При дальнейшем развитии метода наблюдения с помощью орбитального оптического детектора возможно увеличение геометрического фактора в сотни и тысячи раз и изучение космических лучей с энергией 1021 эВ.

Помимо главного преимущества – возможности создания детектора с огромным геометрическим фактором – наблюдения с орбиты спутника имеют ряд важных особенностей, позволяющих получить дополнительные данные о космических лучах предельно высоких энергий. Орбитальный детектор открывает возможность эффективной регистрации событий не только от протонов и ядер космических лучей, создающих ШАЛ на глубинах атмосферы 400–1000 г/см², но и от нейтрино ультравысоких энергий (создающих ШАЛ на глубинах больше 1200 г/см² – «горизонтальные» ливни) и от релятивистских пылинок (создающих короткие лавины вторичных частиц в верхних слоях атмосферы на глубинах 150–250 г/см²). Поиск и изучение нейтрино ультравысоких энергий с помощью детектора ТУС особенно интересен в связи с тем, что масса обзереваемого вещества мишени (атмосферы), где могут взаимодействовать нейтрино, исключительно велика – 1011 т.

Оптический детектор проекта ТУС создается на основе принципиально новой конструкции зеркала – зеркала Френеля, разрабатываемого в НИИЯФ МГУ совместно с РКК «Энергия», ОАО Консорциум «Космическая регата» и ОИЯИ. В этой конструкции зеркало-концентратор создаётся на плоской поверхности, причём отражающие кольца размещаются в соответствии с алгоритмом, обеспечивающим фокусировку пучка света. Плоская конструкция позволяет плотно упаковать зеркало большой площади при транспортировке на орбиту и затем на орбите разворачивать его до полной площади. В фокусе зеркала-концентратора размещается мозаика из большого числа ФЭУ, позволяющая по времени прихода и амплитуде сигнала в индивидуальных ФЭУ измерять в каждом регистрируемом событии направление первичной частицы и каскадную кривую (число вторичных электронов, вызывающих флуоресценцию, как функцию глубины в атмосфере). По интегральному значению числа электронов в каскадной кривой определяется энергия первичной частицы (калориметрический метод), а по положению максимума кривой – природа первичной частицы. Для нахождения абсолютной глубины максимума каскада будет использоваться

информация о рассеянном назад черенковском свете ШАЛ. Высота рассеивающей свет поверхности (облака, море, суша) будет измеряться по времени прихода контрольного сигнала от бортовой лампы-вспышки, импульсы которой генерируются после регистрации трека ШАЛ. В 2005 г. после запуска спутника «Университетский–Татьяна» были экспериментально получены оценки фона ультрафиолетового излучения атмосферы, которые оказались ниже первоначально предполагавшихся.

Высококочувствительный быстродействующий оптический детектор (чувствительность – начиная с одного фотоэлектрона, частота кадров изображения – $5 \cdot 10^6$ Гц) с концентратором света большой площади и сравнительно высоким угловым разрешением (двадцать угловых минут) может быть использован и для изучения грозовых разрядов в верхних слоях атмосферы, прохождения метеоров через атмосферу и т.д. Начало эксперимента планируется на 2009–2010 гг.

Следует упомянуть ещё об одном эксперименте, в котором решается задача, аналогичная поставленной в проекте ТУС. В последнее десятилетие проводились исследования космических лучей с помощью установки СФЕРА, которая с аэростата на высоте 1 км регистрировала отраженное от снежной поверхности черенковское излучение ШАЛ. Установка состоит из сферического зеркала диаметром 1 м и мозаики из 19 ФЭУ-110, расположенных в фокальной плоскости зеркала. В 1998 г. был проведен полет в районе г. Вольска. В 2001 г. организационно оформлено участие НИИЯФ МГУ (Р.А. Антонов и др.) совместно с Физическим институтом РАН в проведении измерений установкой СФЕРА на Российской Антарктической станции Новолазаревская. Первые пробные измерения светового фона, регистрируемого установкой СФЕРА в Антарктиде с высоты 1 км были осуществлены в период 48-й Российской Антарктической экспедиции (РАЭ). К настоящему времени проведена обработка полученных данных о величине светового фона ночного неба в районе станции Новолазаревская, в том числе и во время полярных сияний. Сейчас ведутся работы по созданию новой установки СФЕРА-2, которая позволит регистрировать как отраженный от снежной поверхности черенковский свет ШАЛ, так и флуоресцентный трек ливня в атмосфере. В условиях работы в Антарктиде в варианте привязного аэростата эта установка даст возможность проводить измерения в диапазоне энергий 10^{15} – 10^{18} эВ, а в варианте свободного полета на высоте 30–40 км – в диапазоне от 10^{18} эВ до нескольких единиц 10^{20} эВ.

Таким образом, несмотря на значительные трудности, испытываемые в настоящее время российской наукой, исследования по физике космических лучей в НИИЯФ МГУ успешно продолжаются и их перспективы выглядят обнадеживающими.

Автор выражает благодарность Р.А. Антонову, В.И. Зацепину, Г.В. Куликову, Л.А. Кузьмичеву, Д.М. Подорожному, Т.М. Рогановой, Л.Г. Свешниковой, Ю.А. Фомину, Б.А. Хренову и И.В. Яшину за помощь в подготовке статьи и ценные замечания.