

75 ЛЕТ ФИЗИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

## Исследования космических лучей

Г.Т. Зацепин, Т.М. Роганова

*Освещена история исследований космических лучей в Физическом институте им. П.Н. Лебедева начиная со времени первых работ и до настоящего времени. Рассмотрены основные этапы и направления исследований. Обсуждаются пионерские работы по исследованию ядерно-каскадного процесса в широких атмосферных ливнях, исследованию излучения Вавилова–Черенкова, некоторые работы в области происхождения космических лучей. Приведены последние данные по регистрации частиц сверхвысоких энергий установками Обсерватории им. Пьера Оже и High Resolution Fly's Eye.*

PACS numbers: 01.30.Bb, **01.65.+g**, 95.55.Vj, **96.50.S-**

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200911f.1203

### Содержание

1. Введение (1203).
2. Высокогорные исследования широких атмосферных ливней (1204).
3. Эмульсионные эксперименты (1206).
4. Исследования взаимодействий первичных космических лучей при энергиях  $10^{14}$ – $10^{17}$  эВ методом рентгеноэмulsionционных камер (1206).
5. Исследования космических лучей в верхних слоях атмосферы и на космических аппаратах (1207).
6. Теория космических лучей (1209).
7. Эффект обрезания спектра космических лучей при сверхвысоких энергиях (1209).
8. Заключение (1210).

Список литературы (1210).

Земная атмосфера подвергается бомбардировке частицами больших энергий, приходящих из мирового пространства. Эти частицы называются **первичным космическим излучением**. Проникая в атмосферу, частицы первичного космического излучения теряют свою энергию и постепенно поглощаются, сталкиваясь с атомами кислорода и азота воздуха... В состав первичного космического излучения входят протоны,  $\alpha$ -частицы и, в меньшей степени, более тяжёлые ядра.

Б. Росси *Частицы больших энергий* [1]

Г.Т. Зацепин. Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация  
Тел. (499) 135-14-51

Т.М. Роганова. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobelцина, Воробьевы горы 1, строение 2, 119991 Москва, Российской Федерации  
Тел. (495) 939-36-82  
E-mail: rogam@yandex.ru

Статья поступила 1 июня 2009 г.

### 1. Введение

Исследователи рассматривают первичные космические лучи (ПКЛ), падающие на Землю из космического пространства, и вторичное излучение, рожденное ПКЛ в атмосфере в результате его взаимодействия с атомными ядрами воздуха. Кроме того, различают ПКЛ высоких энергий (вплоть до  $10^{20}$  эВ), которые приходят к Земле не из Солнечной системы, а имеют галактическое (или внегалактическое) происхождение (ГКЛ), и солнечные космические лучи (СКЛ) умеренных энергий ( $\leq 10^{10}$  эВ), связанные с активностью Солнца.

Спектр космических лучей (КЛ) простирается на 10 порядков по энергии и подчиняется степенному закону. Таким образом, интенсивность космических лучей резко убывает с увеличением их энергии. При энергии  $10^{11}$  эВ поток частиц на площадь в  $1 \text{ м}^2$  составляет одну частицу в секунду, при энергии  $10^{15}$  эВ — одну частицу в год, а при энергии  $10^{19}$  эВ на площадь в  $1 \text{ км}^2$  за год падает всего одна частица. В спектре ПКЛ имеется несколько особенностей (изломов спектра) при энергиях  $\approx 3 \times 10^{15}$  и  $\approx 10^{18}$  эВ, и, вероятно, существует обрезание (обрыв) спектра при энергии  $\approx 6 \times 10^{19}$  эВ. Эти особенности могут быть связаны с возможными переходами от одного класса источников КЛ к другому, а также с процессами распространения КЛ в межзвёздной среде.

Энергии частиц КЛ намного превышают энергии, достигнутые на современных ускорителях. В экспериментах на ускорителе Tevatron были получены энергии  $\sim 10^{15}$  эВ, в экспериментах на Большом адронном коллайдере (LHC) будут достигнуты энергии  $\sim 10^{17}$  эВ, в то время как в КЛ присутствуют частицы с энергиями более  $10^{19}$  эВ. Именно поэтому с момента открытия КЛ в их исследованиях присутствовало ядерно-физическое направление — изучение характеристик взаимодействия частиц космических лучей с ядрами атомов воздуха или веществом детекторов. Именно в КЛ были открыты многие новые частицы (миоон, нейтрон, пион и др.).

Плотность энергии космических лучей, которая составляет  $W_{\text{CR}} \sim 10^{-12}$  эрг  $\text{см}^{-3}$ , соизмерима с плотно-

стью энергии магнитного поля  $W_B = B^2/8\pi$  и кинетической энергией вещества  $W_T = (3/2)k_B T$  (здесь  $B$  — напряжённость магнитного поля ( $3 \times 10^{-6}$  Гс),  $n$  — концентрация газа ( $\sim 1$  см $^{-3}$ ),  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура межзвёздного газа). С самого начала исследований КЛ возникли вопросы о том, в каких объектах и в результате каких процессов образуются КЛ, как происходит их ускорение, каким образом КЛ распространяются в межзвёздной среде. Ответы на эти вопросы даёт астрофизика космических лучей, основы которой были заложены в работах В.Л. Гинзбурга и С.И. Сыроватского в середине 1950-х годов [2]. Аспект исследований КЛ в настоящее время является основным при постановке новых экспериментов в космических лучах.

При малых энергиях, при которых в потоке космических лучей основную долю составляют частицы солнечного происхождения, очень существенными оказываются процессы, происходящие на Солнце и в гелиосфере. Эти процессы определяют временные модуляции потока галактических космических лучей с энергиями до  $10^{11}$  эВ, резкие изменения потока СКЛ во время вспышек на Солнце. Исследования в этой области энергий тесно связаны с геофизикой, физикой магнитосферы и физикой плазмы. В последние годы появились работы, указывающие на то, что СКЛ влияют на изменение климата Земли.

Таким образом, исследования космических лучей оказываются тесно связанными с различными областями современной физики: физикой высоких энергий, астрофизикой, физикой низкотемпературной плазмы, геофизикой, метеорологией и др.

История космических лучей в России началась 80 лет назад с первых опытов Д.В. Скobelьцина, проводившего эксперименты с камерой Вильсона в магнитном поле [3]. Начало изучения КЛ в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН совпадает с моментом создания института: в 1934 г. состоялась первая высокогорная экспедиция на Эльбрус, в которой участвовали И.М. Франк, П.А. Черенков, Н.А. Добротин. В дальнейшем работы на Эльбрусе расширялись, с 1937 г. в эти работы включился В.И. Векслер. На Эльбрусе были подробно изучены сильноионизирующие частицы в составе космических лучей, переходный эффект мягкой компоненты, начаты первые опыты по широким атмосферным ливням (ШАЛ), возникающим в атмосфере при взаимодействии частиц первичного космического излучения с ядрами атомов воздуха. В предвоенные годы С.Н. Вернов выполнил обширную программу высотных исследований КЛ с помощью запусков радиозондов на различных геомагнитных широтах (Ленинград, Ереван, экватор). Анализ широтной зависимости потоков КЛ показал, что большую часть их энергии несут заряженные частицы, отклоняемые магнитным полем [4].

## 2. Высокогорные исследования широких атмосферных ливней

В 1944 г. прерванные войной эксперименты по изучению космических лучей были продолжены. Начались высокогорные экспедиции на Памир. Большую роль в развертывании работ сыграл Н.А. Добротин. В 1946 г. в ущелье Чечекты (3380 м над уровнем моря) была построена станция и начаты широкомасштабные эксперименты по изучению процесса образования ливней ядерно-актив-

ными частицами, заложившие фундамент всех дальнейших исследований КЛ в России. На Памире применялась и развивалась новая методика эксперимента: использование различных типов гаджетических установок, камеры Вильсона в магнитном поле в сочетании с ионизационным калориметром.

В конце 1940-х – начале 1950-х годов за время работ на Памире Г.Т. Зацепиным был открыт и изучен ядерно-каскадный процесс, что позволило сформулировать новые закономерности развития ШАЛ при высоких энергиях ( $10^{12} – 10^{14}$  эВ). Была выяснена общая картина прохождения адронов через вещество, установлены важные характеристики элементарного акта сильного взаимодействия при высоких энергиях: показано приблизительное постоянство сечения неупругого взаимодействия первичного нуклона, сохранение первичным нуклоном около половины своей энергии при неупругом соударении, скейлинговое поведение сечений рождения пионов во фрагментационной области и др. [5]. Только спустя четверть века все эти закономерности были подтверждены ускорительными экспериментами. В 1950-е годы было предложено математическое описание ядерно-каскадного процесса, развит эффективный метод решения ядерно-каскадных уравнений — метод последовательных поколений [6].

На рисунке 1 представлена схема развития ядерно-каскадного процесса в атмосфере. Показаны процессы, происходящие при единичном взаимодействии первичной частицы с ядрами атомов воздуха, которые повторяются при вторичных взаимодействиях частиц адронного каскада. В результате возникает электромагнитная компонента, адронная компонента, мюоны и нейтрино, а также излучение Вавилова – Черенкова и флуоресцентное излучение. Все эти вторичные компоненты распределены в плоскости, перпендикулярной направлению движения первичной частицы (фронт ШАЛ). Пространственное распределение связано с поперечными импульсами вторичных частиц, возникающими в процессе взаимодействия, а также многократным и однократным кулоновским рассеянием заряженных частиц. Задачей ядерно-физического раздела физики космических лучей является восстановление параметров ядерного взаимодействия на основе энергетических, пространственных и временных характеристик вторичных компонент каскада.

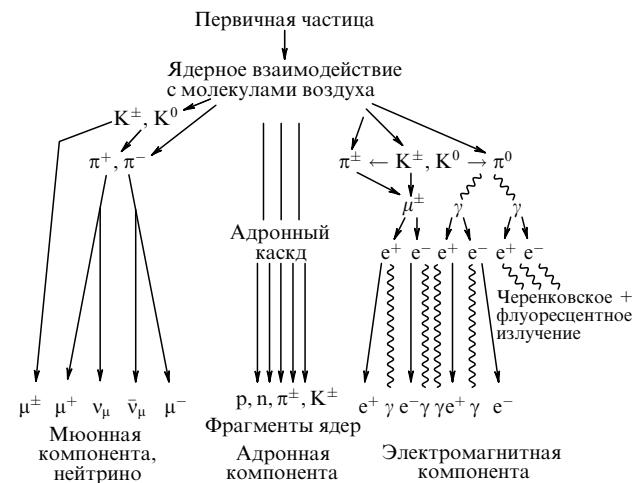


Рис. 1. Схема развития ядерно-каскадного процесса в атмосфере.

В 1950-е годы на Памире А.Е. Чудаковым (в то время также сотрудником ФИАН) были выполнены пионерские работы по изучению черенковского свечения широких атмосферных ливней. В 1955 г. была создана установка, состоящая из девяти узкоугольных и девяти широкоугольных черенковских детекторов и системы газоразрядных счётчиков, регистрирующих ШАЛ [7]. В этом эксперименте была реализована идея "калориметрического по всей атмосфере" измерения энергии каскада путём регистрации черенковского свечения ШАЛ и впервые было измерено соотношение между энергией каскада и наблюдаемым числом частиц. Это позволило определить наклон энергетического спектра в широком энергетическом диапазоне энергий порядка  $10^{14} - 10^{15}$  эВ и оценить массовый состав ПКЛ [8].

Отметим ещё одну пионерскую работу ФИАНа, связанную с использованием черенковского свечения ливней в атмосфере, основанную на предложении А.Е. Чудакова, высказанном в начале 1960-х годов, об использовании черенковского излучения ШАЛ для регистрации источников КЛ. В 1960–1963 гг. в Крыму для поиска локальных источников гамма-квантов с энергиями  $10^{12}$  эВ был сооружён первый черенковский гамма-телескоп, состоящий из 12 параболических зеркал (диаметр каждого 155 см), смонтированных группами по три зеркала на общем поворотном устройстве. Телескоп обладал большой светосилой и позволял регистрировать в небольшом телесном угле ( $\sim 10^{-3}$  ср) широкие атмосферные ливни, вызываемые частицами с энергиями более  $2,5 \times 10^{12}$  эВ. Было показано, что даже при таких энергиях в атмосфере регистрируется значительный поток оптических фотонов, наблюдаемый в течение нескольких десятков наносекунд [9]. Этот эксперимент опередил своё время и во многом определил судьбу развития современной гамма-астрономии. Телескопы со сравнимыми параметрами стали создаваться за рубежом только спустя десятилетие. Разработанная методика предопределила успехи в наблюдении галактических и внегалактических объектов.

Сейчас гамма-астрономия развивается в ФИАНе в эксперименте "Шалон", начатом в 1991–1992 гг. на Тянь-Шане. Зеркальный гамма-телескоп "Шалон" сегодня является единственным в России. В 1992–2008 гг. с помощью системы телескопов "Шалон-1" и "Шалон-2" были проведены наблюдения галактических и метагалактических источников гамма-квантов [10, 11]. Детальный анализ направлений прихода гамма-ливней, по мнению авторов работ [10, 11], выявил присутствие нового источника гамма-лучей, который по координатам совпадает со вновь вспыхнувшей за пределами нашей Галактики сверхновой SN 2006gy.

За последние 30 лет метод регистрации ШАЛ с использованием излучения Вавилова–Черенкова широко использовался в нашей стране и за рубежом. При создании комплексных установок ШАЛ на Тянь-Шане и в Якутске в их состав были включены детекторы черенковского излучения. В начале 1990-х годов в Тункинской долине Бурятии была построена установка "Тунка", с помощью которой сейчас проводятся измерения массового состава ПКЛ в диапазоне энергий  $10^{15} - 10^{17}$  эВ [12].

Следует отметить ещё один знаменательный факт. В середине 1950-х годов при исследовании излучения Вавилова–Черенкова ШАЛ было обнаружено "ионизационное свечение" ШАЛ — люминесценция воздуха под

действием ионизирующего излучения. В 1962 г. А.Е. Чудаков [13] (одновременно с японским физиком К. Suga [14]), основываясь на изотропии флуоресцентного света, предложил использовать для регистрации гигантских ШАЛ с энергиями более  $10^{18}$  эВ ионизационное свечение на больших расстояниях ( $\geq 10$  км) от оси. Тем самым было предвосхищено создание современных наземных (например, установки обсерватории им. Пьера Оже (Pierre Auger) [15]) и спутниковых (Extreme Universe Space Observatory — EUSO) [16] детекторов флуоресцентного света для исследования ШАЛ предельно высоких энергий.

Исследования ШАЛ были продолжены на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН (3340 м над уровнем моря), открытой в 1960 г. вблизи г. Алма-Ата. Была создана большая комплексная установка для исследования первичного космического излучения (ПКИ) при сверхвысоких энергиях ( $10^{14} - 10^{17}$  эВ), развернуто широкое международное сотрудничество, в котором принимали участие учёные Болгарии, Венгрии, Польши и Чехословакии. Работы проводились по двум направлениям. По первому направлению (1961–1970 гг.) было проведено изучение характеристик элементарного акта взаимодействия частиц при энергиях  $10^{11} - 10^{12}$  эВ с помощью камеры Вильсона в магнитном поле в сочетании с ионизационным калориметром (руководитель С.А. Славатинский). В результате были обнаружены асимметричные ливни [17]. По второму направлению (в 1967–1982 гг. общее руководство осуществлял С.И. Никольский) проводилось изучение ПКИ с помощью комплексной установки для исследования ШАЛ в области энергий  $10^{12} - 10^{15}$  эВ. Установка включала в себя самый большой в мире ( $36 \text{ м}^2$ ) ионизационный калориметр (БИК) со свинцовым поглотителем, ливневую установку (спинтилляторы и счётчики Гейгера–Мюллера) с плотной центральной частью, подземный ионизационный калориметр для регистрации взаимодействий мюонов, мюонный годограф и систему детекторов черенковского света. С использованием комплексной установки на Тянь-Шане были получены очень важные результаты: определён массовый состав ПКЛ в диапазоне энергий  $10^{15} - 10^{16}$  эВ [18]; измерен энергетический спектр КЛ в диапазоне энергий  $10^{13} - 10^{17}$  эВ [19]; получено распределение полных и парциальных ( $k_\gamma$ ) коэффициентов неупругости при взаимодействии протонов с энергиями  $10^{12} - 10^{13}$  эВ с ядрами атомов свинца [20]; измерено сечение взаимодействия протонов с энергией  $10^{12} - 8 \times 10^{13}$  эВ с ядрами атомов воздуха [21]; исследовано рождение прямых мюонов адронами ШАЛ высоких энергий [22]; исследована так называемая длиннопробежная компонента в стволах широких атмосферных ливней [23] (высказано предположение о том, что эта компонента образуется очарованными частицами, возникающими при взаимодействии адронов ствола ливня в калориметре). В середине 1980-х годов была создана установка "Адрон", в которой БИК был заменён толчковой установкой ( $162 \text{ м}^2$ ) с рентгено-эмulsionной камерой (РЭК) над ней. На установке "Адрон" были исследованы свойства гамма-семейств, сопоставленных с сопровождающими их ШАЛ [24].

В начале 1980-х годов ФИАН совместно с сотрудниками Ереванского физического института подготовил проект создания в Армении на горе Арагац установки для изучения ШАЛ [25]. Сотрудники ФИАН принимали

непосредственное участие в строительстве этой установки, её эксплуатации и анализе данных, который проводится до сих пор.

Сейчас на Тянь-Шане в продолжение традиций ФИАН начат новый комплексный эксперимент ATHLET (Almaty THree Level Experimental Technique) [26], в котором используются три установки для регистрации ШАЛ: "Адрон-М", ПСКЛ (Промежуточная станция космических лучей) и КАЗНУ (аббревиатура от Казахский национальный университет). Эти установки расположены на разных высотах над уровнем моря: 3340 м, 1750 м и 850 м соответственно. Основой комплекса является установка "Адрон-М" с ионизационным нейтронным калориметром (ИНКА), РЭК, установкой "Гроза", ливневой системой и подземными детекторами. Эксперимент ATHLET предназначен для решения широкого круга задач современной физики космических лучей и астрофизики в диапазоне энергий  $10^{13} - 10^{18}$  эВ, гамма-астрономии высоких энергий ( $\geq 2 \times 10^{14}$  эВ), физики Солнца и космической погоды, изучения процессов развития ШАЛ и сопутствующих им явлений в атмосфере (радиоизлучения и корреляции развития ШАЛ с молниями [27]).

Подводя итог рассмотрению экспериментов по исследованию ШАЛ на высокогорных установках, необходимо отметить, что на протяжении более полувека при проведении этих экспериментов всегда сохранялись комплексный подход к исследованиям, фундаментальность и широта анализа. Именно такой подход позволил получить результаты первостепенной важности, заложить теоретические и экспериментальные основы дальнейших исследований ШАЛ.

### 3. Эмульсионные эксперименты

Рассмотрим ещё одно направление исследований КЛ, которое сформировалось в ФИАН в послевоенные годы и активно развивается сейчас, — это эксперименты с использованием ядерных эмульсий. Эмульсия позволяет выделять частицы при очень большой плотности треков, с высокой точностью определять координаты первичного взаимодействия частиц. Именно с использованием ядерных эмульсий в космических лучах были открыты новые частицы. Первые эксперименты с ядерными эмульсиями были проведены на Памире в начале 1950-х годов. В дальнейшем эти исследования были продолжены Г.Б. Ждановым и М.И. Третьяковой и перенесены на ускорители. В ФИАНе эффективно работала эмульсионная группа, пользующаяся мировым авторитетом.

В 1970-е годы по инициативе Н.А. Добротина и С.И. Никольского были начаты стратосферные эксперименты с использованием эмульсионных камер. Следует отметить большую роль в организации этих экспериментов К.А. Котельникова, в то время руководителя Вольской экспедиционной базы ФИАН. Для научных исследований — экспонирования эмульсионных детекторов в стратосфере на высоте  $\sim 30$  км — была испытана и использована уникальная по протяжённости трасса полётов автоматических аэростатов с полуострова Камчатка до р. Волги [28]. В 1975 г. в одном из таких длительных полётов было зарегистрировано уникальное (с рекордно высокой энергией  $\sim 10^{16}$  эВ) гамма-адронное семейство СТРАНА (СТРАтосферное адронное суперсемейство,

зарегистрированное под руководством Н.А. Добротина) [29], являющееся результатом развития ядерно-электромагнитного каскада в атмосфере. Экспериментальное наблюдение, обработка и анализ событий, зарегистрированных в аэростатных полётах рентген-эмульсионных камер, с целым рядом необычных характеристик позволили получить указание на новое явление — образование во взаимодействиях кольцевых структур. Для интерпретации этого явления была предложена гипотеза существования ядерного аналога эффекта Вавилова — Черенкова [30]. В последние годы новая обработка семейства СТРАНА показала наличие больших перпендикулярных импульсов и компланарного разлёта частиц во взаимодействии, образовавшем это семейство [31]. В 1990-е годы при участии ФИАН с использованием трассы Камчатка — Поволжье был проведён российско-японский баллонный эксперимент RUNJOB (RUssia-Nippon JOint Ballon experiment) по исследованию состава первичных космических лучей при энергиях  $10^{13} - 10^{15}$  эВ [32].

Ядерные эмульсии являются уникальным инструментом исследования благодаря высокому пространственному разрешению. Однако обработка эмульсий всегда оставалась достаточно трудоёмкой и с трудом поддавалась автоматизации. Ситуация заметно изменилась в последнее десятилетие, когда для обработки эмульсий начали применяться современные прецизионные микроскопы (с системой видеозахвата и обработки изображений). Скорость сканирования у таких микроскопов достигает нескольких десятков  $\text{см}^2/\text{час}$ . Впервые в России переход к полной автоматизации анализа фотоэмульсионных материалов был осуществлён в ФИАНе на комплексе ПАВИКОМ (Полностью автоматизированный измерительный комплекс) [33]. Анализ более десяти экспериментов, в том числе экспериментов EMU-15 и RUNJOB, был проведён с использованием этого комплекса. Достигнутая при этом высокая эффективность обработки позволила войти в крупные международные проекты, например в эксперимент OPERA (Oscillation Project with Emulsion-t Racking Apparatus) [34, 35] по прямому наблюдению осцилляций нейтрино  $v_\mu \rightarrow v_\tau$ . В настоящее время с использованием этого комплекса по инициативе В.Л. Гинзбурга решается фундаментальная для физики космических лучей задача поиска треков тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в кристаллах оливарина из метеоритов [36] (проект ОЛИМПИЯ (Оливины из метеоритов, поиск тяжёлых и сверхтяжёлых ядер)).

### 4. Исследования взаимодействий первичных космических лучей при энергиях $10^{14} - 10^{17}$ эВ методом рентгеноэмульсионных камер

В 1971 г. ФИАН возвратился на Памир. Неподалёку от г. Мургаба, в ущельи Ак-Архар (4370 м над уровнем моря), был начат широкомасштабный эмульсионный эксперимент по исследованию взаимодействий ПКЛ при энергиях  $10^{14} - 10^{17}$  эВ методом больших рентгено-эмульсионных камер [37] (руководитель С.А. Славатинский). Этот эксперимент использовал рентгеновские эмульсии в качестве детектора частиц, возникающих в ядерных взаимодействиях. Эксперимент продолжался до 1991 г., суммарная экспозиция, собранных на Памире установок, превысила  $9000 \text{ м}^2$  в год и явилась рекордно

высокой по сравнению с экспозицией в аналогичных экспериментах, выполненных за рубежом. Ежегодно в летний период проэкспонированные рентгеновские плёнки извлекались из установок и заменялись новыми. Плёнки проявлялись, а затем обрабатывались с целью поиска событий — генетически связанных треков частиц, являющихся результатом развития ядерно-каскадного ливня в атмосфере. Эти события были названы гамма-адронными семействами. В эксперименте "Памир" исследовались их пространственно-энергетические характеристики, а также зависимость этих характеристик от полной энергии события, непосредственно связанной с энергией первичной частицы, вызвавшей ядерно-каскадный ливень. Обработка эксперимента, которая проводилась в полуавтоматическом режиме с использованием фотометров, была достаточно трудоёмкой. Именно поэтому было создано сотрудничество "Памир", в котором участвовали физики семи советских и трёх польских научно-исследовательских институтов. В 1980-е годы к этому сотрудничеству присоединились японские физики.

В результате проведения эксперимента "Памир" получены очень важные и интересные результаты. Оценён массовый состав первичного космического излучения в области энергий, превышающих  $10^{16}$  эВ. Показано, что так называемый скейлинг (независимость от энергии формы инклузивных спектров) при высоких энергиях нарушается во фрагментационной области энергий вторичных частиц ядерного взаимодействия; было оценено сечение образования струй с большими поперечными импульсами ( $p_t > 1,5$  ГэВ/с) [38]. Показано, что явление гало — образование диффузного пятна размером  $\sim 1 \text{ см}^2$  — может быть объяснено без привлечения к рассмотрению новых процессов [39]. На рисунке 2 представлена фотография гало в семействе "Фианит".

В эксперименте "Памир" было обнаружено явление "выстроенности" вдоль прямой самых энергичных вторичных частиц, связанное с компланарным разлётом частиц в акте ядерного взаимодействия [40, 41]. На рисунке 3 приведена фотография семейства, в котором присутствует выстроенность энергетически выделенных

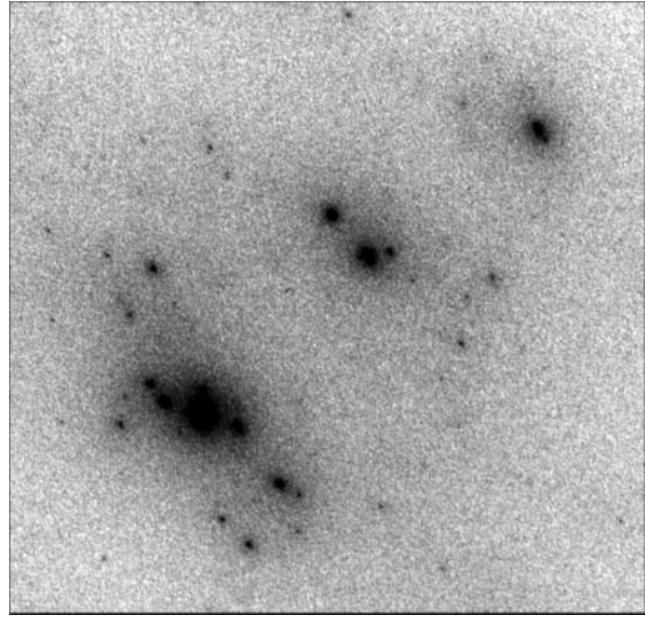


Рис. 3. Фотография "выстроенного" семейства [44].

центр. В эксперименте с глубокой свинцовой камерой в 1987 г. было обнаружено существование длиннопробежной компоненты [42].

Полученные в эксперименте "Памир" результаты до сих пор широко обсуждаются. Особый интерес вызывает существование выстроенности, для объяснения которой выдвинут ряд гипотез (в том числе, механизм разрыва кварк-глюонной струны [43] и модель периферического взаимодействия ядер [44]). Результаты эксперимента "Памир" уникальны. Рекордно высоким является достигнутое в этой области энергий пространственное разрешение, определяющееся возможностями рентгеновской плёнки, рекордно велик и накопленный в эксперименте при энергиях  $\sim 10^{15} - 10^{16}$  эВ статистический материал.

## 5. Исследования космических лучей в верхних слоях атмосферы и на космических аппаратах

Первые измерения космических лучей в стратосфере с использованием ракет были выполнены под руководством С.Н. Вернова сотрудниками Долгопрудненской станции ФИАНа, созданной в 1946 г. Цель работы состояла в выяснении природы космических лучей и механизмов их взаимодействия с веществом. Были разработаны уникальные приборы, изучены электрон-фотонная, мюонная и ядерно-активная компоненты космических лучей в стратосфере, надёжно измерена восточно-западная асимметрия потоков первичных космических лучей в области геомагнитного экватора, которая соответствовала положительному заряду частиц первичной компоненты.

В то же время получили дальнейшее развитие работы с использованием шаров-зондов на разных широтах в стратосфере. С 1958 г. в ряде пунктов СССР, а с 1963 г. и в Антарктиде ведутся регулярные ежедневные запуски шаров-зондов. Собранные таким образом уникальные данные позволили обнаружить гигантские всплески интенсивности КЛ в стратосфере после солнечных всплы-

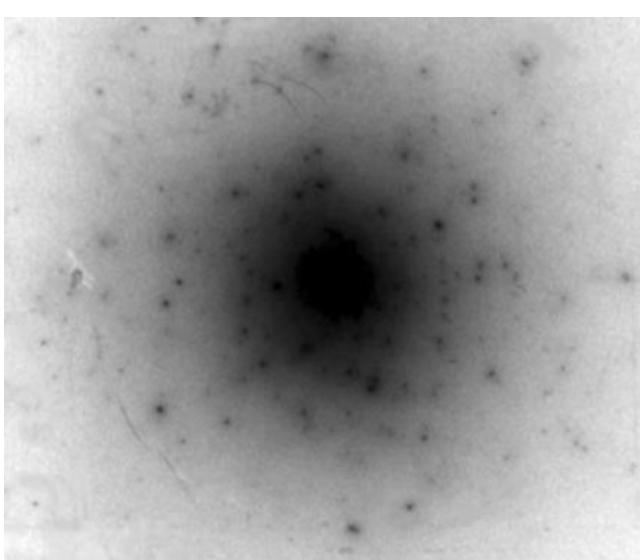
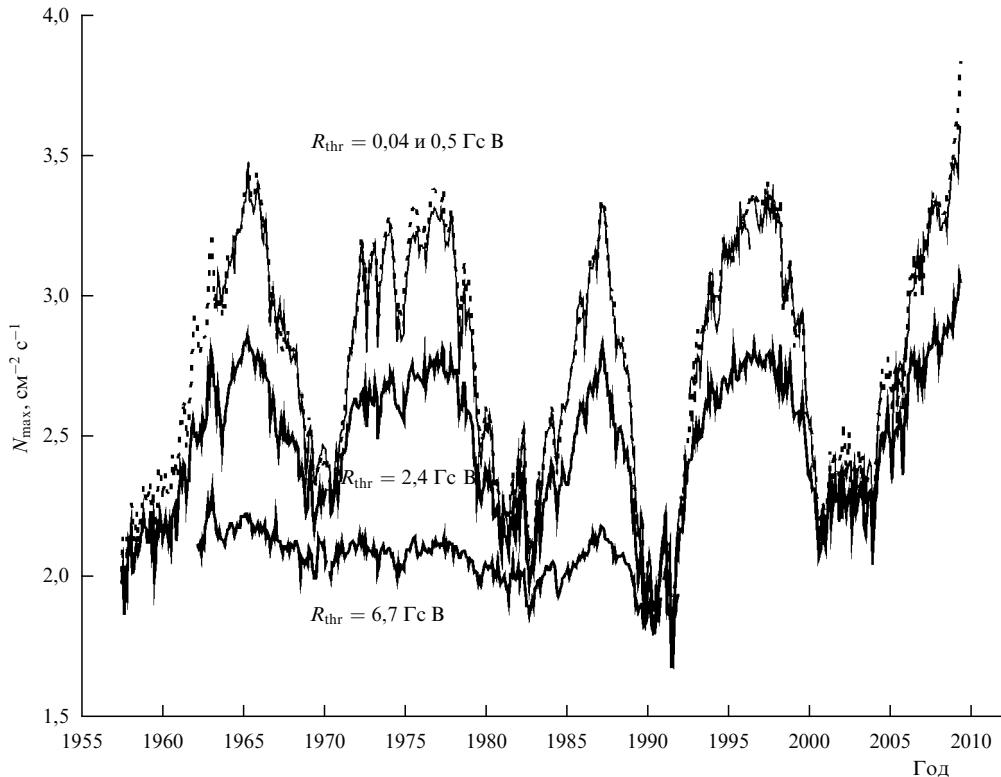


Рис. 2. Фотография гало в семействе "Фианит" [39].



**Рис. 4.** Ряд экспериментальных данных о потоках заряженных частиц в атмосфере разных широт [45]. Пунктирная кривая — северные полярные широты (Мурманск, с 1957 г., пороговая жесткость геомагнитного обрезания  $R_{\text{thr}} = 0,5 \text{ Гс В}$ ), верхняя сплошная — Антарктида (Мирный, с 1963 г.,  $R_{\text{thr}} = 0,04 \text{ Гс В}$ ), средняя — г. Долгопрудный, Московская обл. ( $R_{\text{thr}} = 2,4 \text{ Гс В}$ ), нижняя — Алма-Ата ( $R_{\text{thr}} = 6,7 \text{ Гс В}$ , данные заканчиваются 1992 г.).

шек и выяснить детальную картину влияния 11- и 22-летнего циклов солнечной активности на космические лучи, приходящие из Галактики. Мониторинг интенсивности КЛ на высотах до 30–35 км от уровня земли позволил получить уникальные (единственные в мире протяжённостью в 5 циклов солнечной активности) ряды экспериментальных данных о потоках заряженных частиц в атмосфере разных широт. Впервые наблюдались эффекты инверсии общего магнитного поля Солнца в КЛ. На рисунке 4 представлены экспериментальные данные о потоках заряженных частиц в атмосфере разных широт [45]. За цикл работ по исследованию модуляционных эффектов космических лучей в стратосфере А.Н. Чарахчьян, Г.А. Базилевская, Ю.И. Стожков и Т.Н. Чарахчян в 1976 г. были удостоены Ленинской премии.

Важнейшим элементом программы исследования КЛ явились эксперименты на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) и автоматических межпланетных станциях, которые начались в 1958 г. Уже при запусках первых советских спутников было сделано крупнейшее открытие — обнаружен внешний радиационный пояс Земли [46]. Обнаружение внешнего радиационного пояса Земли было зарегистрировано как открытие. В 1962 г. С.Н. Вернову и А.Е. Чудакову была присуждена Ленинская премия за открытие и исследование радиационных поясов Земли.

С 1958 г. по 1960 г. в ФИАНе под руководством Л.В. Курносовой было проведено семь экспериментов на пяти ИСЗ и космических ракетах. Наиболее достойными внимания следует считать результаты по измерению распределения интенсивности излучения на высотах 200–300 км, приведшие к открытию "Обнаружение

аномалий радиации над Южной частью Атлантического океана на высотах 310–340 км" (впоследствии этот результат был зарегистрирован как открытие "Явление стока частиц радиационных поясов Земли над отрицательными планетарными магнитными аномалиями" [47]).

За период с 1964 г. по 1979 г. в ФИАНе было подготовлено и запущено 12 приборов для регистрации космических лучей и радиации в околосземном пространстве, а также три прибора для проведения методических экспериментов (сверхпроводящие магниты для магнитного спектрометра, проявление ядерных эмульсий на борту и другие). В 1990–1991 гг. был запущен гамматаелескоп "Гамма-1" на международной космической станции "Гамма", и с его помощью впервые было обнаружено гамма-излучение Солнца с энергией более 1 ГэВ [48, 49]. Сейчас разрабатывается гамма-телескоп "Гамма-400" для регистрации гамма-излучения в интервале энергий  $(10^9 - 3 \times 10^{12}) \text{ эВ}$ .

Первые эксперименты с использованием ракет, проведённые сотрудниками Долгопрудненской научной станции ФИАН, сейчас достойно продолжаются исследованиями на космическом аппарате в международном эксперименте PAMELA (Payload for Antimatter-Matter Exploration and Light nuclei Astrophysics) [50]. В 2006 г. установка PAMELA была запущена на борту спутника "Ресурс-ДК1". В этом эксперименте, который продолжается и в настоящее время, уже получены уникальные результаты. Впервые с высокой точностью измерено отношение потока антипротонов к потоку протонов в области энергий  $10^9 - 10^{11} \text{ эВ}$  [51]. Также впервые изме-

рено отношение потока позитронов к суммарному потоку электронов и позитронов в области энергий  $10^9$ – $10^{11}$  эВ. Обнаружено возрастание этого отношения для частиц с энергией более  $2 \times 10^{10}$  эВ, которое может свидетельствовать о существовании новых источников КЛ или новых процессов образования позитронов в межзвёздной среде [52].

## 6. Теория космических лучей

Успехи экспериментальной физики космических лучей в ФИАНе во многом определялись тесной связью с теоретическими работами, которые явились основой интерпретации полученных результатов, предсказали направления исследований, заложили основы теории космических лучей.

В 1940–1960 гг. С.З. Беленьким, Г.Т. Зацепиным, И.Л. Розенталем и др. была развита теория прохождения частиц высокой энергии через вещество. Изданная в 1948 г. монография С.З. Беленького *Лавинные процессы в космических лучах* [53] до сих пор является классическим учебником, который знакомит с основными закономерностями развития электронно-фотонных каскадов.

В 1960-е годы в работах И.Л. Розенталя впервые была показана возможность возникновения каскадов, инициированных космическими лучами в веществе межзвёздной среды [54]. Вывод о влиянии фотонных полей был сделан И.Л. Розенталем до открытия фонового реликтового излучения.

И наконец, создание теории происхождения КЛ, заложившей основы нового направления — астрофизики космических лучей. В 1951 г. была установлена связь между характеристиками электронной компоненты космических лучей и интенсивностью производимого ими в галактических магнитных полях магнитотормозного радиоизлучения [55, 56]. Прогресс в создании теории происхождения космических лучей был достигнут с широким использованием астрофизических (в частности, радиоастрономических) данных в сочетании с изучением первичных КЛ вблизи Земли. В работах В.Л. Гинзбурга и С.И. Сыроватского в 1951–1963 гг. была обоснована гипотеза о том, что источниками КЛ в Галактике являются в основном сверхновые и, возможно, новые звёзды. Были рассмотрены механизмы радиоизлучения, установлена связь между характеристиками электронной компоненты КЛ и интенсивностью магнитотормозного радиоизлучения, предложено уравнение, описывающее распространение частиц в межзвёздной среде, которое в литературе называется уравнением Гинзбурга–Сыроватского [57–60].

## 7. Эффект обрезания спектра космических лучей при сверхвысоких энергиях

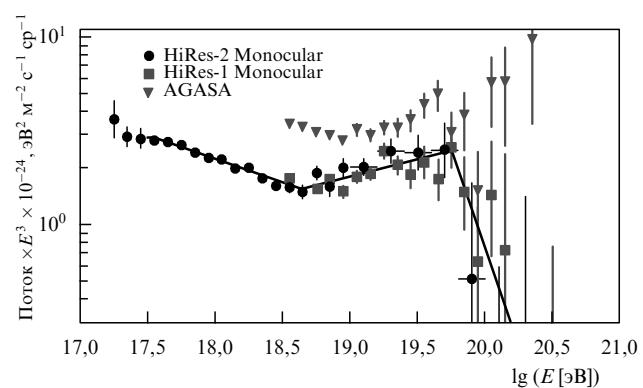
В середине 1960-х годов Г.Т. Зацепин совместно с В.А. Кузьминым предсказал эффект, получивший название эффекта Грейзена, Зацепина, Кузьмина (эффект ГЗК) [61]. Одновременно была опубликована работа Грейзена [62]. Было показано, что при метагалактическом происхождении космических лучей сверхвысоких энергий существует обрезание энергетического спектра КЛ в области энергий выше  $3 \times 10^{19}$  эВ вследствие взаимодействия КЛ с тепловым ( $T \approx 3$  К) излучением Вселенной. С тех пор рассмотрение вопроса о происхождении КЛ

сверхвысоких энергий неизменно проводится с учётом эффекта ГЗК. Теоретические работы [61, 62] строго ограничивают предельное время существования космических лучей сверхвысоких ( $> 10^{19}$  эВ) энергий во Вселенной, что важно для идентификации источников КЛ.

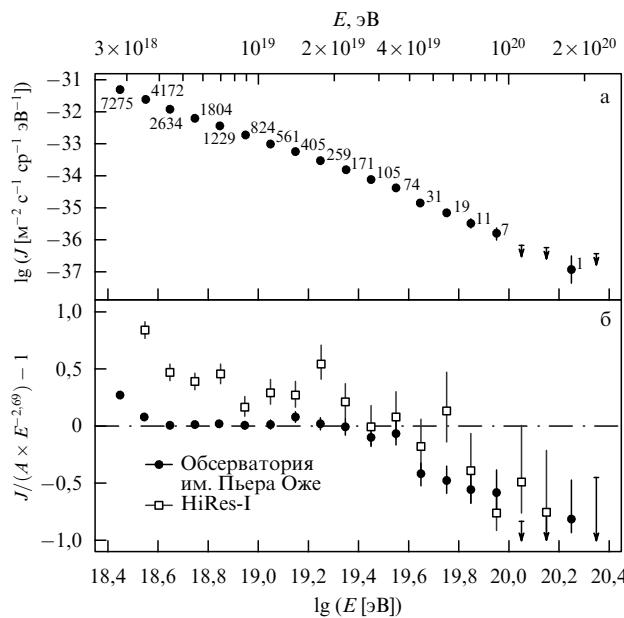
Предсказание эффекта ГЗК стимулировало создание гигантских установок, нацеленных на изучение КЛ сверхвысоких энергий. При непосредственном участии сотрудников ФИАН в 1970 г. была построена комплексная установка в районе Якутска, на которой до сих пор проводятся измерения [63, 64]. Отличительной чертой этой установки являются её большие размеры ( $\approx 20 \text{ км}^2$ ), а также широкое использование для оценок энергии метода оптического черенковского излучения, сопровождающего ШАЛ. В 1982 г. Д.В. Скобельцыну, Н.Н. Ефимову, Д.Д. Красильникову, С.И. Никольскому и Г.Б. Христиансену была присуждена Ленинская премия за исследования первичного космического излучения сверхвысокой энергии, в том числе, на якутской установке ШАЛ.

Исследования с использованием сцинтилляционных счётчиков в 1991–2003 гг. проводились в Японии на установке AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) [65]. В США были созданы установки, основанные на измерениях флуоресцентного света, "Fly's Eye" (от англ. — мушкиный глаз) [66, 67] и HiRes (High Resolution Fly's Eye) [68–70]. На рисунке 5 представлены результаты исследований AGASA и HiRes, которые не согласуются друг с другом. В эксперименте HiRes наблюдаются два излома в энергетическом спектре. Эти изломы, по мнению авторов [70], соответствуют особенностям спектра КЛ — так называемой лодыжке — и ГЗК-эффекту. Статистическая значимость ГЗК-эффекта  $5\sigma$ . Энергия обрезания ( $5,6 \pm 0,5 \pm 0,9$ )  $\times 10^{19}$  эВ.

В 2004 г. измерения первичного излучения сверхвысоких энергий начались на комплексной установке Обсерватории им. Пьера Оже в Аргентине [15]. В этом эксперименте участвуют 100 институтов и университетов из 17 стран. Наблюдение проводится с помощью четырёх детекторов, регистрирующих флуоресцентный свет ШАЛ, и 1660 наземных детекторов измеряют черенковский свет, создаваемый на уровне наблюдения заряженными частицами ШАЛ в водных детекторах. Установка расположена на высоте 1390 м над уровнем моря ( $875 \text{ г см}^{-2}$ ) и имеет рекордно большую площадь (около  $3000 \text{ км}^2$ ).



**Рис. 5.** Спектр космических лучей [70], измеренный установками AGASA [65] и HiRes [68–70]. Отдельно приведены спектры установок HiRes-1 и HiRes-2, которые проводили измерения в монокулярном режиме.



**Рис. 6.** Результаты [71] измерений спектра частиц сверхвысоких энергий. (а) Дифференциальный поток космических лучей сверхвысоких энергий в зависимости от энергии. Числа у точек — имеющаяся статистика. (б) Сравнение данных Обсерватории им. П. Оже и установки HiRes-I, поделенных на степенный спектр с показателем наклона 2,69:  $J$  — интенсивность дифференциального энергетического спектра,  $A$  — интенсивность спектра, измеренного в Обсерватории им. П. Оже при энергии  $4 \times 10^{18}$  эВ.

На рисунке 6 представлены результаты работы [71] по измерению интенсивности ливней в области ГЗК-обрезания. Как видно из рисунка, наблюдается согласие (в пределах статистики) данных Обсерватории им. Пьера Оже и HiRes при самых высоких энергиях — уменьшение потока при энергиях более  $4 \times 10^{19}$  эВ. При энергиях меньших  $4 \times 10^{19}$  эВ результаты HiRes-1 показывают более мягкий спектр. Данные AGASA не приводятся, поскольку на основании [72] авторы [71] делают вывод, что они изменились. Гипотеза о том, что спектр КЛ продолжается с неизменным наклоном при энергиях, превышающих  $4 \times 10^{19}$  эВ, отвергается с достоверностью  $6\sigma$ . В работе [73] высказано предположение о том, что источники КЛ с энергиями более  $5,7 \times 10^{19}$  эВ являются экстрагалактическими и находятся на расстояниях менее 75 Мпк. Авторы [71] считают, что полученные результаты не противоречат ГЗК-эффекту. Полное понимание причин "укручения" спектра КЛ, по мнению авторов [71], последует после того, как будет определён массовый состав частиц предельно высоких энергий и будут уменьшены систематические неопределённости.

Очевидна сложность проведения экспериментов при энергиях  $10^{19} - 10^{20}$  эВ. Очевидно и то, что статистика может быть заметно увеличена лишь при возрастании на порядок площадей установок (на площади порядка  $1 \text{ km}^2$  ожидается регистрация только нескольких событий за тысячелетие).

## 8. Заключение

История исследований космических лучей в Физическом институте им. П.Н. Лебедева продолжается уже более 80 лет. За это время были поставлены новые эксперименты и детально разработаны оригинальные методы

исследований. Фундаментальные результаты получены на высокогорных станциях космических лучей на Памире, Тянь-Шане и Арагаце, где были созданы комплексные установки и проведены пионерские исследования методом ШАЛ (открыт ядерно-каскадный процесс). С использованием рентгеновомульсионных камер открыты новые явления — гало, выстроенность и т.д. Впервые были разработаны калориметрические методы, основанные на регистрации черенковского свечения ШАЛ. В ФИАНе были проведены также первые эксперименты по гамма-астрономии.

ФИАН всегда находился на переднем крае науки — первые эксперименты на ракетах и космических аппаратах были нацелены на изучение космических лучей и позволили получить фундаментальные результаты (например, открытие внешнего радиационного пояса Земли). В результате регулярных измерений космических лучей на высотах до 30–35 км от уровня земли на шарах-зондах были получены уникальные ряды данных, позволившие, например, установить связь интенсивности КЛ с активностью Солнца.

В ФИАНе родилась астрофизика космических лучей, создана теория прохождения частиц высокой энергии через вещество, предложен механизм обрезания спектра частиц сверхвысоких энергий (ГЗК-обрезание), исследование которого в настоящее время проводится гигантскими наземными установками и в дальнейшем планируется выполнить на космических аппаратах.

Конечно, в кратком изложении невозможно охватить все стороны исследований КЛ в ФИАНе и трудно претендовать на полноту их освещения. Авторы приносят извинения за это и выражают искреннюю благодарность всем сотрудникам ФИАНе, предоставившим многочисленные свидетельства славного пути ФИАНе в исследованиях космических лучей. Особая благодарность — Н.М. Нестеровой, В.П. Павлюченко, В.С. Пучкову и М.И. Фрадкину за помощь и предоставленную возможность увидеть историю ФИАНе в фотографиях.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, госконтракт № 02.740.11.5092.

## Список литературы

- Rossi B B *High-Energy Particles* (New York: Prentice-Hall, 1952) [Росси Б Частицы больших энергий (М.: ГИТТЛ, 1955) с. 5]
- Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. *Происхождение космических лучей* (М.: Изд-во АН СССР, 1963) [Ginzburg V L, Syrovatskii S I *The Origin of Cosmic Rays* (Oxford: Pergamon Press, 1964)]
- Skobelzyn D Z. *Phys.* **54** 686 (1929)
- Вернов С.Н. *ДАН СССР* **23** 141 (1939)
- Зацепин Г.Т. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: ФИАН СССР, 1954)
- Зацепин Г.Т., Розенталь И.Л. *ДАН СССР* **99** 369 (1954)
- Chudakov A E et al., in *Extensive Air Showers and Cascades Process Vol. 2 Proc. of the 6th Intern. Cosmic Ray Conf.: ICRC, Moscow, 1959* (Eds V I Zatsepin, B A Khrenov) (Moscow: IUPAP, 1960) p. 50
- Kulikov G V et al., in *Extensive Air Showers and Cascades Process Vol. 2 Proc. of the 6th Intern. Cosmic Ray Conf.: ICRC, Moscow, 1959* (Eds V I Zatsepin, B A Khrenov) (Moscow: IUPAP, 1960) p. 85
- Chudakov A E et al., in *Extensive Air Showers: Proc. of the 8th Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC, Jaipur, 1963* Vol. 4, p. 199
- Синицына В.Г. и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **73** 696 (2009) [Sinitsyna V G et al. *Bull. Russ. Acad. Sci.* **73** 657 (2009)]
- Синицына В.Г. и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **71** 941 (2007) [Sinitsina V G et al. *Bull. Russ. Acad. Sci.* **71** 906 (2007)]
- Korosteleva E E et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **165** 74 (2007)

13. Чудаков А Е, in *Proc. of the 5th InterAmerican Seminar on Cosmic Rays, La Paz, Bolivia, 1962* Vol. 2 (La Paz, Bolivia: Laboratorio de Fisica Cosmica de la Univ. Mayor de San Andres, 1962) p. 44
14. Suga K, in *Proc. of the 5th InterAmerican Seminar on Cosmic Rays, La Paz, Bolivia, 1962* Vol. 2 (La Paz, Bolivia: Laboratorio de Fisica Cosmica de la Univ. Mayor de San Andres, 1962) p. 49
15. Abraham J et al. (AUGER Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **523** 50 (2004)
16. Takizawa Y et al., in *Proc. of Intern. Workshop on Cosmic-Rays and High Energy Universe* (Eds T Shibata, N Sakaki) (Tokyo, 2007) p. 187
17. Славатинский С А *Труды ФИАН* **46** 40 (1970)
18. Стаменов Й А, Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: ФИАН СССР, 1982)
19. Nesterova M N et al., in *Proc. of the 24th Intern. Cosmic Ray Conf.: ICRC, Rome, Italy 1995* Vol. 2 (Eds N Iucci, E Lamanna) (Rome: IUPAP, 1995) p. 748
20. Павлюченко В П и др. *Труды ФИАН* **109** 30 (1979)
21. Нам Р А и др. *Труды ФИАН* **109** 131 (1979)
22. Вавилов Ю Н, Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: ФИАН СССР, 1987)
23. Яковлев В И *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физ. эксперимента* (3) 20 (1984)
24. Абдрашитов С Ф и др. *Изв. АН СССР Сер. физ.* **50** 2203 (1986) [Abdrashitov S F et al. *Bull. Acad. Sci. USSR. Phys.* **50** (11) 123 (1986)]
25. Авакян В В и др. *УФН* **132** 395 (1980) [Avakyan V V et al. *Sov. Phys. Usp.* **23** 711 (1980)]
26. Mukhamedshin R A et al., in *Proc. of the 28th Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC, Tsukuba 2003, Japan*, Vol. 3 (Eds T Kajita et al.) (Tsukuba: IUPAP, 2003) p. 977; Амурин И В и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **69** 353 (2005).
27. Gurevich A V et al. *Phys. Lett. A* **325** 389 (2004)
28. Kotelnikov K A et al. *Indian J. Radio Space Phys.* **20** 209 (1991)
29. Goncharova L A et al., in *Proc. of the 23d Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC, Canada, 1993* Vol. 4 (Eds D A Leahy, R B Hickws, D Venkatesan) (Singapore: World Scientific, 1993) p. 21
30. Chernavskaya O D et. al. in *Proc. of the 24th Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC, Rome 1995* Vol. 1 (Eds N Iucci, E Lamanna) (Rome: IUPAP, 1995) p. 68
31. Манагадзе А К и др. *Письма в ЭЧАЯ* (3) 19 (2002)
32. Derbin V A et al. *Astrophys. J.* **628** L41 (2005)
33. Калинин С А и др. *Наука — производству* (12) 29 (2000)
34. Acquaredda R et al. (OPERA Collab.) *New J. Phys.* **8** 303 (2006)
35. Галкин В И и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **71** 594 (2007) [Galkin V I et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **71** 579 (2007)]
36. Гинзбург В Л и др. *Докл. РАН* **402** 472 (2005) [Ginzburg V L et al. *Dokl. Phys.* **50** 283 (2005)]
37. Добротин Н А и др., Препринт № 172 (М.: ФИАН, 1972)
38. Байбурина С Г и др. (Сотрудничество Памир) *Труды ФИАН* **154** 3 (1984)
39. Puchkov V S et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **122** 263 (2003)
40. Борисов А С и др. (Сотрудничество "Эксперимент Памир") *Изв. АН СССР Сер. физ.* **49** 1285 (1985) [Borisov A S et al. ("Experiment Pamiir" Collab.) *Bull. Acad. Sci. USSR* **49** (7) 38 (1985)]
41. Барадзей Л Т и др. (Сотрудничество "Эксперимент Памир") *Изв. АН СССР Сер. физ.* **55** 650 (1991)
42. Ракобольская И В и др. *Особенности взаимодействий адронов космических лучей сверхвысоких энергий* (М.: Изд-во Московск. ун-та, 2000) с. 118
43. Royzen I *Mod. Phys. Lett. A* **9** 3517 (1994)
44. Borisov A S et al. *ЭЧАЯ* **36** 1227 (2005) [*Phys. Part. Nucl.* **36** 643 (2005)]
45. Svirzhevsky N S et al., in *Proc. of the 31st Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC, Lódź, Poland, 7–15 July 2009* (submitted)
46. Вернов С Н и др. *ДАН СССР* **120** 1231 (1958) [Vernov S N et al. *Sov. Phys. Dokl.* **3** 617 (1958)]
47. Курносова Л В и др. *Искусств. спутники Земли* (8) 90 (1961) [Kurnosova L V et al. *Planetary Space Sci.* **9** 513 (1962)]
48. Акимов В В и др. *Письма в Астрон. журн.* **18** 167 (1992) [Akimov V V et al. *Sov. Astron. Lett.* **18** 69 (1992)]
49. Акимов В В и др. *Письма в Астрон. журн.* **19** 579 (1993) [Akimov V V et al. *Astron. Lett.* **19** 229 (1993)]
50. Picozza P et al. *Astropart. Phys.* **27** 296 (2007)
51. Adriani O et al. (PAMELA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **102** 051101 (2009)
52. Adriani O et al. *Nature* **458** 607 (2009)
53. Беленький С З *Лавинные процессы в космических лучах* (М.: Гостехиздат, 1948)
54. Розенталь И Л *Астрон. журн.* **44** 563 (1967) [Rozental I L Sov. Astron. **11** 448 (1967)]
55. Гинзбург В Л *УФН* **62** 37 (1957)
56. Сыроватский С И *Астрон. журн.* **36** 17 (1959)
57. Гинзбург В Л, Сыроватский С И *УФН* **71** 411 (1960) [Ginzburg V L, Surovatskii S I Sov. Phys. Usp. **3** 504 (1961)]
58. Гинзбург В Л *УФН* **51** 343 (1953)
59. Гинзбург В Л *Изв. вузов Сер. Радиофиз.* **1** 3 (1958)
60. Гинзбург В Л, в сб. *Труды междунар. конф. по космическим лучам, Москва, 1959* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1960) с. 200
61. Затепин Г Т, Кузьмин В А *Письма в ЖЭТФ* **4** 114 (1966) [Zatsepin G T, Kuzmin V A *JETP Lett.* **4** 78 (1966)]
62. Greisen K *Phys. Rev. Lett.* **16** 748 (1966)
63. Ефимов Н Н и др., в сб. *Проблемы физики космических лучей* (Сост. Е В Горчаков) (М.: Наука, 1987) с. 288
64. Pravdin M I, in *Proc. of the 26th Intern. Cosmic Ray Conference: ICRC, Salt Lake City, USA, 1999* Vol. 3 (Eds D Kieda, M Salamon, B Dingus) (Berlin: Springer-Verlag, 1999) p. 292
65. Takeda M et al. *Astropart. Phys.* **19** 447 (2003)
66. Bird D J et al. *Phys. Rev. Lett.* **71** 3401 (1993)
67. Bird D J et al. *Astrophys. J.* **441** 144 (1995)
68. Abu-Zayyad T et al., in *Proc. of the 26th Intern. Cosmic Ray Conference: ICRC, Salt Lake City, USA, 1999* Vol. 5 (Eds D Kieda, M Salamon, B Dingus) (Berlin: Springer-Verlag, 1999) p. 349
69. Boyer J H et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **482** 457 (2002)
70. Abbasi R U et al. (High Resolution Fly's Eye Colab.) *Phys. Rev. Lett.* **100** 101101 (2008)
71. Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 061101 (2008)
72. Teshima M, in *Ist Roma Intern. Conf. on Astroparticle Physics, RICAP'07, June 20–22, 2007, Roma, Italy*
73. Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Astropart. Phys.* **29** 188 (2008)
74. Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Science* **318** 938 (2007)

## Cosmic ray investigations

### G.T. Zatsepin

*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences  
prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-499) 135-14-51*

### T.M. Roganova

*D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University,  
Vorob'evy gory 1, stroenie 2, 119991 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-495) 939-36-82  
E-mail: rogatm@yandex.ru, rgn@decl.npi.msu.ru*

An historical review is given of cosmic ray research carried out at the P.N. Lebedev Institute from the time the Institute entered the field to the present. The key stages and directions of the research are outlined. The pioneering studies on the nuclear cascade process in extensive air showers and on the Vavilov – Cherenkov radiation are discussed. Some work on the origin of the cosmic rays is reviewed. The latest data on superhigh energy particle detection at the Pierre Auger Observatory and HiRes installation are presented.

PACS numbers: 01.30.Bb, **01.65.+g**, 95.55.Vj, **96.50.S-**

Bibliography — 74 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **179** (11) 1203–1211 (2009)

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200911f.1203

Received 1 June 2009

*Physics – Uspekhi* **52** (11) (2009)