

## Результаты экспериментов в космических лучах с использованием эмульсионных детекторов

И. В. Ракобольская<sup>1,a</sup>, Т. М. Роганова<sup>2,b</sup>

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, <sup>1</sup>физический факультет, кафедра физики космоса; <sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скobel'цина (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

*E-mail: <sup>a</sup>nlinde@mail.ru, <sup>b</sup>rogatm@yandex.ru*

Статья поступила 15.01.2010, подписана в печать 17.02.2010

Рассмотрены результаты экспериментов с использованием рентгеноэмульсионных камер, выполненных в НИИЯФ МГУ за последние 40 лет. Широкомасштабные эксперименты по исследованию космических лучей этой методикой были начаты в НИИЯФ МГУ в 1968 г. при активной поддержке Сергея Николаевича Вернова, 100-летие со дня рождения которого мы отмечаем в 2010 г. В результате были проведены наиболее обширные измерения спектра мюонов космических лучей, исследования характеристик взаимодействия адронов сверхвысоких энергий в эксперименте «Памир», получены данные о массовом составе первичного космического излучения в стратосферных экспериментах. Авторы статьи принимали участие в постановке этих экспериментов, а также в проведении и анализе полученных данных. Накопленный за многие годы опыт работы с эмульсионным материалом в настоящее время используется в эксперименте OPERA по исследованию осцилляций нейтрино.

**Ключевые слова:** космические лучи, взаимодействие с веществом, спектр космических лучей, мюоны, нейтрино.

УДК: 539.171.017. PACS: 96.50.Vj.

### Введение

Ядерная эмульсия используется в экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий. Столь продолжительная жизнь методики, безусловно, связана с уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения треков частиц. Ни один из известных детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое дает эмульсия: при размере зерна 0.3–1 мкм отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0.8 мкм и при определенных условиях может составлять 0.2 мкм. Использование двусторонней эмульсии позволяет достигать точности в определении углов лучше, чем миллирадиан. К недостаткам ядерной эмульсии следует отнести отсутствие временной привязки — детектируются все частицы, прошедшие через нее. Это приводит к регистрации значительного числа фоновых частиц и уменьшает время допустимой экспозиции, например, на ускорителе. Кроме того, просмотр больших площадей детекторов, как правило, с большим увеличением до последнего времени представлял собой достаточно сложную техническую проблему.

В 1960-е гг. важным методическим инструментом изучения космических лучей стали рентгеновские эмульсии (пленки), на которых большое число одновременно прошедших электронов оставляет заметный след — почернение, хорошо видное невооруженным глазом. Рентгеновская пленка состоит из плексигласовой прозрачной гибкой пластины толщиной 200 мкм, покрытой с двух сторон эмульсионным гелем толщиной 30 мкм. Отличие геля, используемого в рентгеновских

пленках, от ядерных эмульсий состоит в том, что число центров скрытого изображения, образующихся вдоль следа электрона, в 5–10 раз меньше, а площадь зерна после проявки в 30–40 раз больше. Японские физики использовали рентгеновские пленки для поиска следов частиц в ядерных эмульсиях при совместном их использовании. В середине 1960-х гг. было показано, что мерой энергии частицы, создавшей ливень, могут быть размеры пятна почернения, вызванного вторичными частицами [1]. Это означало возможность использовать рентгеновские эмульсии как аналог ионизационного калориметра [2]. Вместе с ядерными эмульсиями и свинцовыми пластинами плотного поглотителя (например, свинца) рентгеновские пленки включались в состав рентгеноэмульсионных камер (РЭК), которые применялись в различных экспериментах при полетах в стратосфере, на установках в горах и в подземных экспериментах.

В 1960–1970-е гг. был развит метод РЭК: проведены измерения и теоретические расчеты, позволившие измерять энергию каскадов, развивающихся в камерах, с хорошей точностью [3]. Эти каскады возникают в плотном поглотителе и регистрируются рентгеновской пленкой на разных стадиях развития в виде двух пятен почернения с центрами, смешенными друг относительно друга на расстояние  $r = d/\cos\theta$  мкм, где  $\theta$  — угол падения частицы на камеру,  $d$  — толщина пленки. Если энергия первичной частицы превышает 2–4 ТэВ то пятна могут быть обнаружены невооруженным глазом<sup>1</sup>. Значение плотности почернения (или потемнения) пятна измеряется с помощью фотометра с круговой диафрагмой радиуса  $R$ .

<sup>1</sup> Пороговая энергия определяется многими факторами, в основном качеством пленки и ее проявки.

## 1. Эксперимент по регистрации мюонов космических лучей

К началу семидесятых годов в мире с использованием разнообразных методов были получены результаты по изучению мюонов космических лучей. Это прежде всего их энергетическое и зенитно-угловое распределение. Согласно консервативной теории, мюоны генерируются в атмосфере в основном при распаде пионов и каонов, которые образуются в ядерных взаимодействиях первичных космических частиц (нуклонов) с ядрами атомов воздуха в верхних слоях атмосферы.

Известно, что изучение энергетического спектра мюонов позволяет получить важную информацию о характеристиках первичного потока нуклонов. Кроме того, исследование зенитно-угловых распределений мюонов дает возможность оценить долю каонов в процессах генерации мюонов или же увидеть наличие новых процессов генерации мюонов. Это определяется тем, что зенитно-угловые распределения мюонов, рожденных в результате распада пионов и каонов, описываются зависимостью  $\sec \theta$ , где  $\theta$  — зенитный угол прихода мюонов. В случае существования процессов прямой генерации мюонов в ядерных взаимодействиях, например при распаде короткоживущих частиц, зенитно-угловые распределения мюонов становятся изотропными.

Энергетический спектр мюонов в области энергий до  $10^{12}$  эВ был получен в 1960-е гг. в экспериментах по исследованию мюонов при помощи магнитных спектрометров [4] и на основе изучения кривой поглощения мюонов в грунте [5]. Показатель степени наклона спектра первичных нуклонов, определенный в этих экспериментах  $\gamma_N = 1.6 \pm 0.1$ , согласовывался с концепцией консервативной теории генерации мюонов при распаде пионов и каонов. В то же время в работах НИИЯФ МГУ [6] и ФИАН [7] с использованием для регистрации электронно-фотонных ливней, созданных мюонами, ионизационных калориметров были получены пологие спектры мюонов в области энергий  $10^{11} - 10^{13}$  эВ. Результаты этих экспериментов было возможно согласовать с данными, полученными из изучения кривой поглощения мюонов в грунте, лишь в предположении существования при энергиях  $\geq 1$  ТэВ новых процессов генерации мюонов. В то же время на установке в соляных копях Дж. В. Кейффель [8] получил зенитно-угловое распределение мюонов с энергией  $\sim 2$  ТэВ с довольно высокой степенью изотропии и предположил, что половина мюонов с энергией  $\sim 2$  ТэВ рождается в процессах, отличных от распада пионов и каонов.

В такой обстановке представлялось очень важным измерить в области энергий мюонов  $10^{12} - 10^{14}$  эВ одновременно на одной установке зенитно-угловое и энер-

гетическое распределения мюонов в максимально широком диапазоне зенитных углов. Было предложено использовать в качестве детектора под землей РЭК большой площади<sup>1</sup>. В 1968 г. была создана установка, состоящая из 146 глубоких свинцовых камер с линейными размерами  $1 \times 0.5$  м и толщиной  $\sim 53$  рад. ед.<sup>2</sup>, расположенных в подземном помещении московского метрополитена под углами  $0, 45$  и  $60^\circ$  к горизонтальной плоскости. Такая конструкция камер (предложенная Г. Т. Зацепиным) позволяла с одинаковой эффективностью регистрировать тормозные гамма-кванты, образованные как вертикальными, так и горизонтальными потоками мюонов, и определять энергетические спектры и угловые распределения мюонов с энергией выше 2–3 ТэВ. Уже самые первые результаты, полученные на установке «Мюон», показали, что при энергиях мюонов от 2 до 10 ТэВ они генерируются в процессах распада  $\pi^\pm$ - и  $K$ -мезонов, спектр которых описывается консервативной теорией [3].

В ходе проведения эксперимента были решены многочисленные методические вопросы: проведены оценки влияния на точности результатов процедуры проявления пленок, регрессии скрытого изображения, рассеяния света в фотометре и пленке, наличия зазора между пленкой и свинцом. Учитывались также искажения спектров из-за влияния флуктуаций. Точность определения энергии каскада была проверена абсолютной калибровкой метода по массе нейтрального пиона, распавшегося в мишени, помещенной над РЭК [9]. Было показано, что энергия индивидуального каскада в интервале 2–5 ТэВ определяется без смещения и относительная ошибка измерения энергии равна 20%. Экспериментально была показана необходимость учитывать эффект Ландау–Померанчука–Мигдала при энергии фотона выше 10 ТэВ. Таким образом, был разработан и обоснован метод определения энергии ЭФК с использованием глубокой свинцовой РЭК.

Экспозиция РЭК в московском метро продолжалась более 20 лет и составила  $3.06 \cdot 10^{17}$  г·с·ср. Это позволило получить уникальную статистику и исследовать процессы при энергии выше 10 ТэВ. За эти годы зарегистрировано более 20 тыс. электронно-фотонных каскадов (ЭФК), из них более 8500 ЭФК образовано тормозными фотонами с энергией больше 2 ТэВ. Были получены угловые распределения и глобальный энергетический спектр мюонов в диапазоне  $0-89^\circ$  с энергией 3–50 ТэВ [10, 11], а также спектры вертикального ( $0-66^\circ$ ) и горизонтального ( $66-89^\circ$ ) потоков мюонов.

Анализ горизонтального энергетического спектра в области энергий до 50 ТэВ показал, что значение показателя спектра пионов и каонов составляет  $\gamma_{\pi,K} = 1.68 \pm 0.05$ . При этом показатель спектра пер-

<sup>1</sup> Для этого требовалось подземное помещение на небольшой глубине, сотни тонн свинца, тысячи квадратных метров рентгеновской пленки, различная аппаратура и люди... Руководителем эксперимента стала И. В. Ракобольская. Эксперимент был развернут в комнатах бомбоубежища на станциях метро «Парк культуры» и «Кропоткинская», в которых можно было работать только по ночам. По постановлению правительства были выделены фондуемые материалы — 250 т свинца и рентгеновская пленка в количестве  $4000 \text{ м}^2$  в год. В подвале главного здания МГУ был создан проявочный центр, найдены измерительные приборы (микроскопы и фотометры). В работу включились преподаватели кафедры космических лучей, дипломники, лаборанты.

<sup>2</sup> Радиационная единица длины (каскадная, ливневая,  $t$ -ед.) — расстояние  $x_0$ , на котором интенсивность гамма-излучения в потоке электронов высокой энергии ослабляется в  $e$  раз. С помощью радиационной ед. длины многие сложные процессы (тормозное излучение, образование пар, многократное кулоновское рассеяние) записываются в простой форме.

вичных нуклонов равен  $\gamma_N = 1.65 \pm 0.05$  в энергетическом интервале 20–400 ТэВ. В то же время было получено уложение вертикального спектра мюонов при значениях энергии более 20 ТэВ, указывающее на существование процессов быстрой генерации мюонов. Экспериментальные данные по угловому распределению и спектру вертикальных мюонов согласовывались с расчетами Л. В. Волковой [12] при допущении доли генерации быстрых мюонов 0.2–0.4% от пионов той же энергии, что соответствовало сечению рождения чармированных адронов  $\sigma_c \sim 1\text{--}2$  мб при энергиях первичных нуклонов  $\sim 100$  ТэВ.

Использование многопараметрического анализа экспериментального материала по энергетически-угловым распределениям ЭФК на основе подробных теоретических расчетов дифференциальных распределений мюонов и ЭФК, генерированных в РЭК [13], позволило уменьшить статистические ошибки в значениях  $\gamma_N$  и  $\sigma_c$ . Было получено значение показателя степени первичных нуклонов, равное  $\gamma_N = 1.64 \pm 0.03$ , что соответствует показателю степени спектра  $\pi$ - и  $K$ -мезонов, равному  $\gamma_{\pi,K} = 1.67 \pm 0.03$ , и эффективному сечению рождения чарма  $\sigma_c = 1.7 \pm 0.5$  мб/нуклон при энергии нуклона 100 ТэВ. Доля быстрых мюонов по отношению к доле пионов меняется при этом от  $0.26 \pm 0.08\%$  при энергии мюона 5 ТэВ до  $0.33 \pm 0.10\%$  при  $E_\mu = 40$  ТэВ.

На рис. 1 представлена зависимость отношения числа вертикальных ЭФК ( $0\text{--}60^\circ$ ) к числу горизонтальных ЭФК ( $60\text{--}89^\circ$ ) от энергии каскада  $E_\gamma$  из работы [13] для оптимальных значений  $\gamma_N$  и  $\sigma_c$ . Величина  $P(\chi^2)$  равна  $\sim 0.1$  и  $\leqslant 10^{-5}$  для вариантов расчета соответственно с учетом и без учета генерации чарма.

На рис. 2 из работы [13] приведены энергетические спектры горизонтального и вертикального потоков мюонов, полученные в работе [13], а также данные о потоках мюонов, полученные в [14–16]. Полученное в работе [13] сечение образования чарма при энергии  $\sim 50$  ТэВ в несколько раз превышало предсказания теоретических моделей (доля мюонов прямой генерации, соответствующая значению этого сечения, не должна превышать  $\sim 10^{-3}$ ). К сожалению, и экспериментальных данных о сечениях образования чармированных частиц в этой энергетической области до сих пор недостаточно.

Многочисленные эксперименты по исследованию спектра мюонов, выполненные в последние пятнадцать лет, показали, что измерения спектра мюонов с использованием кривой поглощения, как правило, не указывают на существование процессов прямой генерации. В то же время эксперименты с использованием калориметрических методов давали указание на избыточный поток мюонов. В частности, существование избыточного потока мюонов при энергиях  $E_\mu \geq 100$  ТэВ было получено в эксперименте на Баксане группы МИФИ [17], где показано, что в области энергий выше 100 ТэВ наблюдается изменение спектра мюонов и не исключается более высокий (на уровне  $R \approx 3 \cdot 10^{-3}$  при энергии  $\sim 100$  ТэВ) вклад чармированных частиц. Вывод этой работы согласуется с представленными выше результатами эксперимента МГУ.

Таким образом, для изучения процессов генерации мюонов космических лучей высокой энергии в МГУ

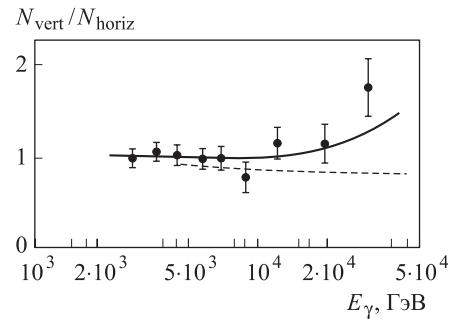


Рис. 1. Отношение числа каскадов от вертикального потока мюонов к числу каскадов от горизонтального потока. Точки — экспериментальные данные работы [13]. Сплошная кривая — расчет для потока мюонов с учетом генерации чарма, штриховая — расчет без учета генерации чарма

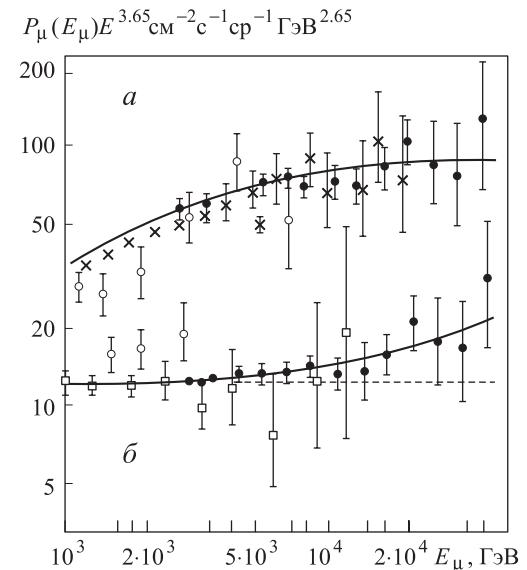


Рис. 2. Дифференциальные энергетические спектры мюонов: *а* — для горизонтального потока мюонов, *б* — для вертикального. Точки — экспериментальные данные работы [13], кружки — результаты [14], кресты — [15], квадраты — [16]; сплошная кривая — расчет для потока мюонов с учетом генерации чарма, штриховая — расчет без учета генерации чарма

впервые была создана и проэкспонирована под землей крупномасштабная установка из многослойных свинцовых РЭК. Анализ экспериментального материала по энергетически-угловым распределениям ЭФК в РЭК показал на значительный вклад мюонов, рожденных при распаде чармированных частиц. Результаты этого эксперимента актуальны и сейчас. Полученная оценка генерации чарма противоречила заключениям, следовавшим из анализа поглощения мюонов в грунте. Однако в 2009 г. группой МИФИ было показано, что данные Баксанской установки приводят к оценке, согласующейся с выводами эксперимента МГУ.

## 2. Эксперимент «Памир»

В начале 1970-х гг. по инициативе С. Н. Вернова, Е. Л. Фейнберга и Н. А. Добротина начался грандиоз-

ный эксперимент на Памире, в урочище Ак-Архар на высоте 4400 м. Основным элементом детектора также были рентгеноэмulsionционные камеры, использовалось 2000 тонн свинца. Площадь РЭК достигала 1000 м<sup>2</sup>, экспозиция каждой закладки рентгеновских пленок длилась около года. Целью эксперимента, который продолжался до 1991 г., было исследование взаимодействий частиц космических лучей с ядрами атомов воздуха при энергиях 10<sup>14</sup>–10<sup>17</sup> эВ [18]. Суммарная экспозиция собранных на Памире установок явилась рекордной по сравнению с аналогичными экспериментами, выполненными за рубежом.

На Памире использовались камеры различных конструкций. В состав так называемых углеродных камер помимо свинцовых пластин и рентгеновской пленки был включен углеродный блок, в котором должны были происходить взаимодействия. Кроме того, на Памире экспонировались глубокие свинцовые РЭК однородной конструкции, состоящие из свинцовых пластин, переслоенных рентгеновскими пленками. Конструкция свинцовых камер была аналогична конструкции камер, используемых для изучения мюонов в эксперименте, о котором шла речь в первом разделе. Это было очень важно, поскольку в обоих экспериментах методические разработки могли проводиться по скоординированной программе.

Работа с такими большими площадями эмульсии требовала специальной техники и большого числа участников. Головной организацией эксперимента был ФИАН. Всеми работами руководил профессор С. А. Славатинский. Среди участников эксперимента, представлявших разные страны (Японию, Бразилию, Польшу) и разные институты, были сотрудники НИИЯФ МГУ и физического факультета (руководили работами И. В. Ракобольская и И. П. Иваненко).

Значительная статистика и хорошее пространственное разрешение треков частиц позволило в эксперименте «Памир» проверить различные модели ядерных взаимодействий. Оказалось, что для частиц с энергиями, меньшими  $E = 10^{14}$ –10<sup>15</sup> эВ, характеристики взаимодействия не противоречат параметрам, экспатрируемым из ускорительных данных. Однако при больших энергиях появляются существенные отличия: нарушается скейлинг во фрагментационной области взаимодействия [19]. Это проявляется в том, что спектры лидирующих нуклонов становятся мягче с увеличением атомного номера ядра мишени и с увеличением энергии взаимодействия. Кроме того, для объяснения интенсивности гамма-адронных семейств необходимо было предположить увеличение коэффициента неупругости во взаимодействиях с ядрами атомов воздуха до величины 0.64–0.70 при 1000 ТэВ при росте сечения взаимодействия нуклонов с воздухом 8–10% на порядок по энергии. Эти тенденции хорошо воспроизводятся классом моделей кварк-глюонных струн.

В эксперименте «Памир» также наблюдались события с несколькими центрами, которые могут быть выстроены в линию. Появление выстроенных событий может быть связано как с влиянием на развитие ядерно-электромагнитного каскада в воздухе нового физического процесса (с компланарным разлетом вторичных частиц), так и с флуктуациями в развитии

самого каскада. Различие между экспериментом и модельными расчетами, выполненными в рамках обычной кварк-глюонной картины взаимодействия, указывало на неизвестный физический механизм возникновения при ядерном взаимодействии резкой асимметрии. Расчеты показали, что вероятность случайного появления таких событий очень мала, что может свидетельствовать о существовании новых явлений в ядерных взаимодействиях.

Методика глубоких свинцовых камер внесла существенный вклад в изучение феномена «выстроенности» частиц. Был предложен новый подход к анализу этого явления — рассмотрение энергетически выделенных центров (ЭВЦ). Этот подход дал возможность увеличить в 10 и более раз статистику экспериментальных и расчетных событий, используемых для анализа «выстроенности», а также проследить энергетическую зависимость эффекта. Было показано, что компланарно разлетаются не только гамма-кванты высокой энергии, но и адроны, регистрация которых приводит к увеличению доли выстроенных событий, регистрируемых свинцовыми камерами, по сравнению с данными углеродных камер, у которых эффективность регистрации адронов меньше (рис. 3 из работы [20]). Был установлен также энергетический порог явления «выстроенности», приблизительно равный 10<sup>16</sup> эВ, и указано на существование возможной связи явления «выстроенности» с большими поперечными импульсами частиц, возникающими в таких взаимодействиях [21]. За последние годы статистика по данным углеродных камер в эксперименте «Памир» была заметно увеличена, анализ выстроенности с использованием этого материала подтвердил наличие самого эффекта и его энергетическую зависимость. Кроме того, анализ выстроенности

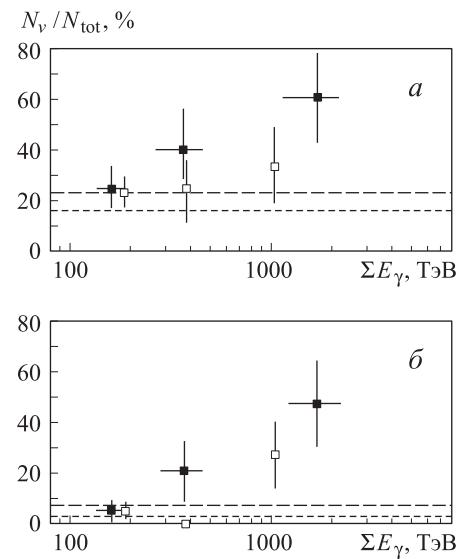


Рис. 3. Зависимость доли событий с выстроенными ЭВЦ среди гамма-адронных семейств от энергии семейства  $\sum E_\gamma$  для трех (а) и четырех (б) энергетически выделенных центров в каждом семействе. Чёрные квадраты — экспериментальные данные по глубоким свинцовым камерам эксперимента «Памир»; полые квадраты — данные по углеродным камерам. Штриховые линии: длинный штрих — расчет по MSF-модели; короткий штрих — для случайно брошенных точек

гамма-адронных семейств был проведен также китайскими физиками на основе данных глубоких железных рентгеноэмulsionционных камер, экспонированных на горе Канбала в Тибете. Этот анализ также показал согласие с экспериментальными данными памирского эксперимента. Уникальное выстроенное событие было зарегистрировано и в эксперименте на сверхзвуковом самолете «Конкорд» в семействе с первичной энергией выше  $10^{16}$  эВ. Таким образом, явление выстроенности, возможно, свидетельствует о существовании неизвестных процессов в области энергий более  $10^{16}$  эВ.

Иногда в РЭК наблюдались события с числом частиц, превышающим сотни. Таким семействам были даны собственные имена, например «Фианит», «Татьяна» и др. Семейство «Фианит» содержит до 50 подструктур. Оно вызвано первичной частицей с энергией  $E > 10^{17}$  эВ. В семействе «Татьяна» видны 225  $\gamma$ -квантов и 65 адронов с суммарной энергией  $E = 1.7 \cdot 10^{16}$  эВ. В таких семействах на рентгеновской пленке наблюдались пятна почернения размером до нескольких сантиметров, которые были названы «гало» (рис. 4 из работы [22]). Было показано, что «гало» генерируются узкими пучками частиц большой плотности. Ряд таких событий можно описать как развитие чисто электронно-фотонного каскада сверхвысокой энергии в атмосфере, упавшего на рентгеноэмulsionционную камеру [19].

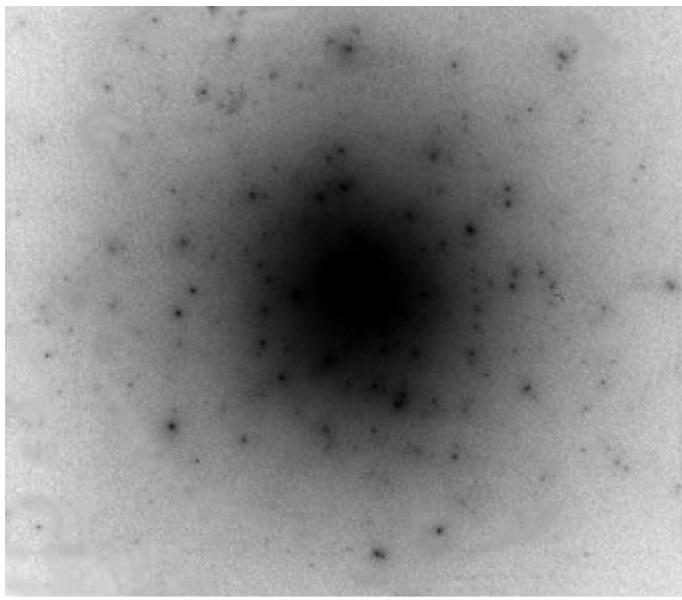


Рис. 4. Фотография гало в семействе ФИАНИТ [21]

Использование в эксперименте глубоких свинцовых камер позволило получить интересные результаты, которые и до сих пор входят в число главных достижений эксперимента «Памир». Был проведен единственный в своем роде эксперимент по изучению поглощения в свинцовом поглотителе адронов космического излучения с энергиями несколько десятков ТэВ до глубины  $7\lambda_{int}$  с пространственным разрешением 300 мкм. Показано, что закон поглощения адронов не носит экспоненциального характера, что следовало бы из расчетов по современным моделям. В частности, было обнаружено, что на глубине свинца больше  $(3-4)\lambda_{int}$  наблюдается избыток каскадов от адронов [19] (рис. 5).

Происхождение этого избытка до сих пор не установлено. Такие каскады могут возникать в результате образования в верхних слоях вещества заряженных частиц, продукты которых, распадаясь на гамма-кванты и электроны, дают начало каскадам на больших глубинах. В этом случае необходимо допустить при энергиях  $\sim 30$  ТэВ сечение рождения заряженных частиц равным  $\sigma_c^{pp} = 3.3 \pm 1.5$  мб. Это сечение больше того, что можно ожидать из экстраполяции ускорительных данных, однако с точностью до коэффициента  $\sim 2$  согласуется с сечением, полученным из мюонного эксперимента, который подробно обсуждался в разд. 1.

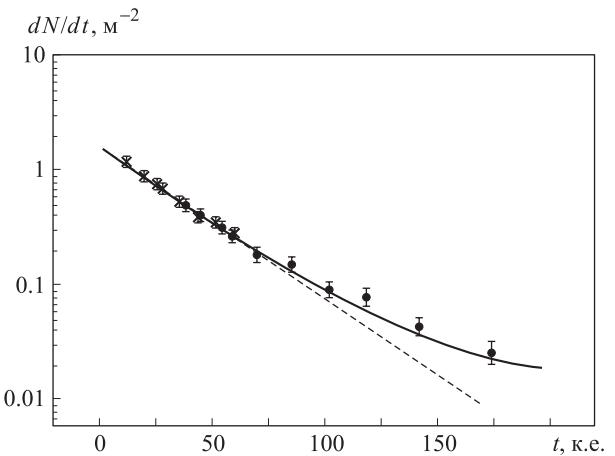


Рис. 5. Экспериментальное (точки и крестики) и расчетное (сплошная линия) распределение каскадов по глубине возникновения в свинце; расчет получен в предположении, что на камеру падают две компоненты с пробегом поглощения в свинце 210 (90% каскадов) и 2000 г/см<sup>2</sup> (10% каскадов), (пунктир — экспоненциальное поглощение с пробегом 210 г/см<sup>2</sup>)

Другое объяснение существования длиннопробежной компоненты еще более экстравагантно и состоит в том, что необходимо предположить существование новых, не известных и не наблюдавшихся на ускорителе адронов, сечение взаимодействия которых с ядрами свинца почти в 10 раз меньше сечения ядерного взаимодействия. Для уточнения природы длиннопробежной компоненты группой НИИЯФ МГУ был предложен следующий эксперимент [19]: на Памире была установлена камера специальной конструкции с воздушным зазором в 2.5 м, разделяющим камеру на две части. К сожалению, этот эксперимент был приостановлен из-за экономических проблем. Осуществление этого эксперимента позволило бы ответить на вопрос о природе проникающих частиц.

### 3. Стратосферные эксперименты

Рассмотренные в настоящей работе эксперименты, проведенные с использованием подземных установок и установок, расположенных высоко в горах, были нацелены на исследования вторичных частиц, возникающих в результате ядерных взаимодействий космических лучей с ядрами атомов воздуха. Эксперименты, выполненные в стратосфере, позволяют регистрировать частицы и ядра первичного космического излучения

(ПКИ), поскольку частицы, попадающие из космоса на такие высоты, проходят незначительное количество (порядка  $10 \text{ г}/\text{см}^2$ ) вещества. Доля возникающих при этом вторичных частиц незначительна, поэтому такие эксперименты называются прямыми.

В НИИЯФ МГУ в разное время были выполнены два эксперимента с эмульсионными камерами по исследованию зарядового состава ПКИ. В первом эксперименте, который получил название MUBEE и выполнялся в 1975–1987 гг., проведена серия из восьми полетов аэростатов на высотах 32 км с эмульсионными камерами, содержащими наряду с рентгеновскими пленками для измерения энергии дополнительные слои ядерных эмульсий для измерения заряда первичных ядер. 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 10–100 ТэВ. В этой серии экспериментов [23], как и ранее на спутниках серии «Протон», было получено указание на различие показателей степени спектров протонов и ядер с  $Z > 2$  и укручивание спектра протонов при  $E_p \geq 10 \text{ ТэВ}$ .

Вторым экспериментом, в котором авторы этой статьи принимали непосредственное участие, стал эксперимент RUNJOB (Russian–Nippon Joint–Ballon experiment) [24]. Эксперимент был проведен в 1995–1999 гг. группой сотрудников НИИЯФ МГУ совместно с ФИАН им. П. Н. Лебедева и японскими физиками из семи японских университетов. Целью этого эксперимента было изучение зарядового состава и энергетических спектров первичных космических лучей в области энергий от 10 ТэВ до нескольких сотен ТэВ. Было выполнено десять полетов РЭК сложной конструкции (рис. 6) на баллонах от Камчатки до бассейна Волги в среднем на высоте 32 км. Камеры имели структуру с десятками слоев светочувствительных детекторов (рентгеновской пленки и ядерной эмульсии), слоями углерода или стали в мишени, а также слоями свинца (толщиной до 2 мм) в тонком калориметре. Полная продолжительность экспозиции составила 1440 ч. Обработка и анализ данных проводились в России и Японии по скординированной программе. При этом использовалось современное оборудование (сканирующие микроскопоппы, видеодигитайзеры и CCD-камеры), позволяющее проводить обработку эмульсионного материала в полуавтоматизированном режиме. В эксперименте были получены спектры протонов и ядер гелия (рис. 7), более тяжелых ядер и спектры всех частиц [25]. Наклоны спектров протонов и ядер гелия не различаются в пределах ошибок. Спектр протонов в области  $10^{13}–10^{15} \text{ эВ}$  хорошо согласуется с данными прямых экспериментов JACEE и СОКОЛ.

Новизна методики эксперимента RUNJOB состояла в развитии и использовании при обработке данных нового способа выделения тяжелых ядер, основанного на сканировании рентгеновских пленок «экранного типа» (SXF). Этот способ позволяет уменьшить порог регистрации тяжелых ядер и дает возможность полу-

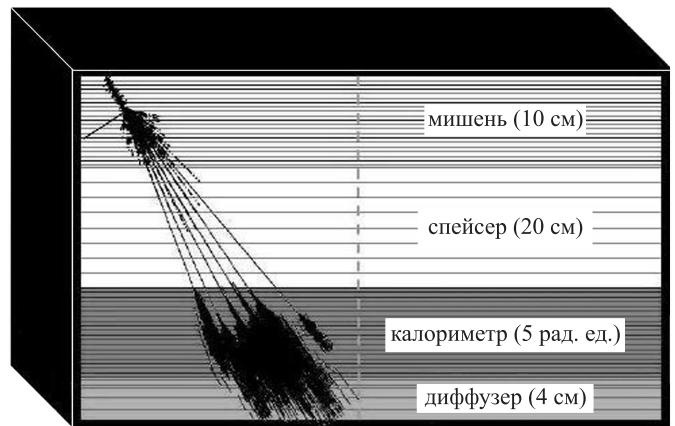


Рис. 6. Конструкция камеры в эксперименте RUNJOB

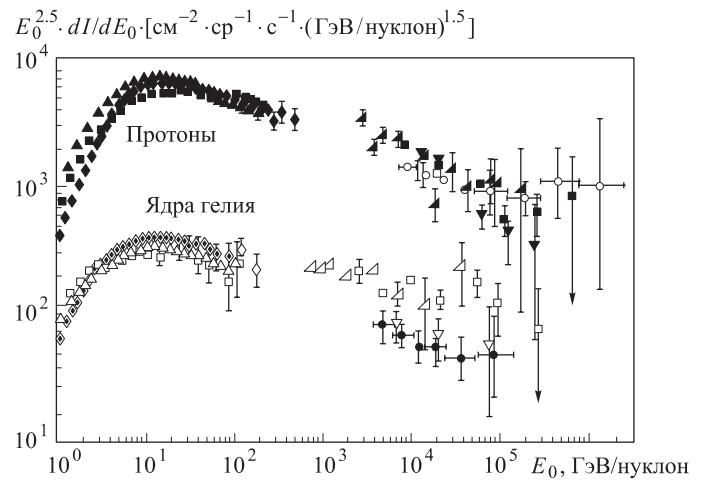


Рис. 7. Полученные в эксперименте RUNJOB [23] спектры протонов и ядер гелия совместно с данными других экспериментов. Кружки — данные эксперимента RUNJOB, квадраты — эксперимент JACEE, перевернутые треугольники — MUBEE-эксперимент. При малых энергиях приведены данные экспериментов AMS, BESS-TeV и IMAX

чить в рамках одного эксперимента энергетический спектр и интенсивность потока ядер с зарядом  $\geq 24$  в энергетическом диапазоне 0.1–100 ТэВ/част. Пленки экранного типа SXF представляют собой наборы из двухслойных рентгеновских пленок, помещенных между двумя тонкими экранами из сцинтиллятора. Когда тяжелое ядро проходит через пленку SXF, в обоих экранах происходят вспышки света, которые регистрируются в рентгеновских пленках как двойное пятно, различимое невооруженным взглядом [26] (рис. 8). Плотность числа пятен на рентгеновской пленке после недельной экспозиции в стрatosфере составляет около 200 пятен на квадратный сантиметр. Автоматизация измерений позволила обрабатывать пленки SXF и соответственно привела к новому методу регистрации ядер — методу «вершинного триггера». Поиск пятен почернения на пленках, создаваемых ядрами первого космического излучения, и измерение их координат на ПАВИКОМ<sup>1</sup> проводилось в полностью

<sup>1</sup> ПАВИКОМ — созданный в ФИАН им. П. Н. Лебедева, высокотехнологичный Измерительный КОМплекс для обработки ядерных эмульсий.

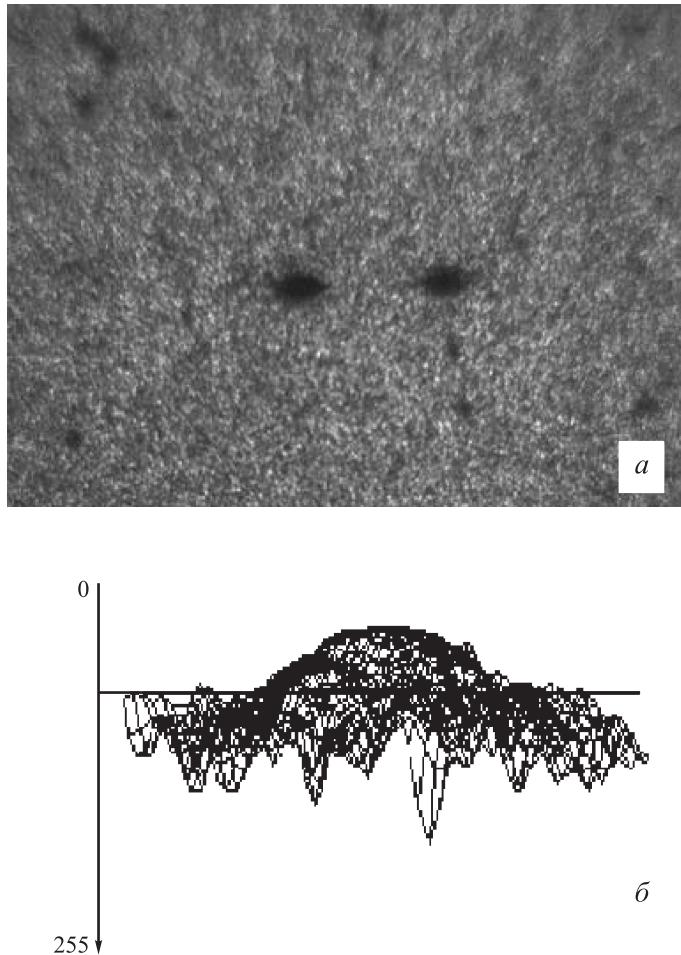


Рис. 8. Пятно от ядра, прошедшего через двухстороннюю SXF пленку и автоматически найденного при сканировании на ПАВИКОМе (а). Трехмерное изображение пятна на SXF пленке (б) (данные работы [23])

автоматическом режиме по специально разработанным программам [26]. Для каждого типа пятна измерялись его координаты, размер, величина потемнения в центре и среднее потемнение. По экспериментальному материалу камеры 1996 г. восстановлены треки от тяжелых ядер, построены угловые распределения, найдены зарядовые диапазоны регистрируемых частиц, оценена эффективность регистрации частиц, получены целеуказания для поиска следов ядер в эмульсии. Найдено 2000 треков тяжелых ядер. Направление исследований с использованием эмульсий и их автоматизированной обработки оказалось очень перспективным. В 1975 г. в эмульсионном баллонном эксперименте в стратосфере в полете по маршруту Камчатка–Поволжье на высоте около 30 км группой К. А. Котельникова (ФИАН) было зарегистрировано уникальное гамма-адронное семейство частиц «СТРАНА» с энергией свыше  $10^{16}$  эВ. Это событие является результатом практически «чистого» ядерного взаимодействия частицы ПКИ, так как по условиям наблюдения в стратосфере отсутствуют возможности для каскадного размножения вторичных частиц, рожденных в данном акте, что резко отличает это семейство от событий, регистрируемых ниже (на уровне гор).

В 2001 г. семейство «СТРАНА» было повторно обработано в НИИЯФ МГУ с использованием ком-

плекса ПАВИКОМ. При этом был обнаружен яркий эффект выстроенности вдоль прямой линии в плоскости регистрации пяти высокоэнергичных адронов [27], соответствующая этой выстроенности анизотропия в пространственном распределении еще 30 частиц данного семейства и сопутствующая эффекту выстроенности очень большая величина поперечных импульсов вторичных частиц ( $\sim 10$  ГэВ/с) в соответствующем ядерном взаимодействии [21].

На основании этих фактов в настоящее время рассматривается возможность изучения подобных явлений при энергии  $E_0 \geq 10^{16}$  эВ в эксперименте на коллайдере LHC [28].

#### 4. Эксперимент OPERA

Накопленный за многие годы опыт работы с эмульсиями и овладение новыми методами их автоматизированной обработки позволили сотрудникам НИИЯФ МГУ вместе с сотрудниками ФИАН им. П. Н. Лебедева и ИЯИ РАН включиться в новые международные эмульсионные эксперименты.

Одной из задач физики элементарных частиц и астрофизики является измерение массы нейтрино, которое возможно при исследовании нейтринных осцилляций — процесса изменения аромата движущегося в вакууме или веществе нейтринного пучка. В случае если нейтрино имеют массу и реализуется гипотеза смешивания, регистрируемые  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$  являются суперпозицией трех состояний  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$  [29]. Начиная с 1957 г. проводится множество различных экспериментов по поиску нейтринных осцилляций: Minos, SuperKamiokande, OPERA и др. Эксперимент OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) — проект по прямому наблюдению эффекта осцилляций нейтрино с использованием эмульсионного детектора. В этом международном эксперименте принимают участие около 200 физиков из 34 институтов, в том числе и российские (НИИЯФ МГУ, ФИАН им. Лебедева, ИЯИ РАН).

Проект эксперимента OPERA был предложен в 2000 г. С помощью ускорителя SPS, расположенного в CERN, создается пучок  $\nu_\mu$  и направляется на детектор, находящийся на расстоянии  $L = 732$  км от CERN в подземной лаборатории Гран Сассо. Основной элемент детектора — эмульсионные пластины, в которых исследуются события, связанные с взаимодействиями нейтрино, в том числе, вероятно, и таонных нейтрино, появление которых вызвано эффектом осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ . Эмульсионный блок состоит из 57 эмульсионных пластин, чередующихся с 56 свинцовыми пластинами. Размер блока составляет  $127 \times 102 \times 75.4$  мм, масса  $\sim 8.3$  кг. Главной целью эксперимента OPERA является определение параметров  $\sin^2 2\theta_{23}$  и  $\Delta m^2$ , которые могут быть оценены по количеству зарегистрированных таонов.

Создание детектора началось в 2003 г. В 2004 г. были завершены работы по подготовке пучка. В 2006 г. состоялся первый запуск пучка из ЦЕРНа и тестирование его совместной работы с электронными детекторами в Гран Сассо [30]. В 2007 г. был проведен тестовый эксперимент с электронными и эмульсионными детекторами — обнаружены события, связанные

с взаимодействием нейтрино в эмульсионных кирпичах. В 2008 г. был проведен первый физический этап, в результате которого суммарная интенсивность пучка SPS составила  $1.78 \cdot 10^{19}$  протонов на мишень [31]. В 2009 г. в эксперименте была достигнута суммарная интенсивность  $3.2 \cdot 10^{19}$  протонов на мишень и получено около 3500 событий, связанных со взаимодействием нейтрино в эмульсионной мишени детектора.

В настоящее время проводится обработка и анализ событий с использованием автоматизированных сканирующих приборов в Европе (примерно 20 приборов) и Японии (примерно семь приборов), в которых принимают участие российские участники эксперимента. В 2010 г. планируется ввод 2-х автоматизированных сканирующих приборов в России.

Анализ событий включает исследование топологии событий, особенности которой должны явиться основным признаком появления в пучке мюонного нейтрино нейтрино таонных. К настоящему времени уже обнаружено 20 событий, связанных с образованием чармированных частиц (время жизни чармированных частиц сопоставимо с временем жизни тау-лептона), которые по топологии похожи на таонные события. Таким образом, начат систематический анализ событий, связанных с распадом, в результате которого уже на имеющейся статистике 2008 и 2009 г. возможно обнаружение событий, связанных с распадом таона.

### Заключение

Таким образом, рассмотренные эксперименты с использованием ядерных эмульсий показывают высокую эффективность метода и его уникальные возможности. Рекордное пространственное разрешение определяет и долголетие метода, а также возможность получения статистически обеспеченного экспериментального материала. Автоматизированная обработка эмульсий, широкое их использование совместно с электронными детекторами (например, в эксперименте OPERA) позволяет надеяться на дальнейшее развитие этой методики в физике космических лучей, физике высоких энергий и нейтринной физике.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам НИИЯФ МГУ, внесшим неоценимый вклад в развитие эмульсионной методики и проведение экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-91005-ЦЕРН\_a), Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-959.2008.2) и Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт № 02.740.11.5092).

### Список литературы

1. Baradzei L.T., Kanevskaya E.A., Smorodin Yu.A. // Acta Phys. Hung. 1970. **29**, Suppl. 4. P. 33.
2. Григоров Н.Л., Мурзин В.С., Раппопорт И.Д. // ЖЭТФ. 1958. **34**, № 2. С. 506.
3. Аминева Т.П., Астафьев В.А., Варковицкая А.Я. и др. Исследование мюонов сверхвысоких энергий. М., 1975.
4. Ashton F., Tsuji K., Wolfendale A.W. // Nuovo Cimento. 1972. **9B**. P. 344.
5. Barton J.C. // Philos. Mag. 1961. **6**. P. 1271; Miyake S., Narasimham V.S., Ramana Mutty P.V. // Nuovo Cimento. 1964. **32**. P. 1505.
6. Христиансен Г.Б. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. **33**. С. 1483.
7. Ерлыкин А.Д., Куличенко А.К., Мазниченко С.С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1972. **36**. С. 1751.
8. Keuffel J.W., Osborn J.L., Bolingbroke G.L. // Proc. 11th ICRC. Budapest, 1969.
9. Osipova E.A., Rakobolskaya I.V., Kulikova A.M. и др. // Proc. 18th ICRC. Bangalore, 1983. **8**. P. 100.
10. Afanasieva T.N., Ivanova M.A., Ivanenko I.P. et al. // Proc. 20th ICRC. Moscow, 1987. **6**. P. 161.
11. Зацепин Г.Т., Иванова М.А., Иваненко И.П. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. **55**, № 4. С. 740.
12. Волкова Л.В., Зацепин Г.Т., Кузьмичев Л.А. // Ядерная физика. 1979. **29**. С. 1252; Volkova L.V., Pulgione W., Galleotti P. // Nuovo Cim. 1985. **10C**. P. 465; Волкова Л.В. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 1990.
13. Зацепин Г.Т., Ильина Н.П., Калмыков Н.Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1994. **58**, № 12. С. 119.
14. Alkofer O.C., Carstensen K., Bella G. et al. // Proc 17th ICRC. Paris, 1981. **10**. P. 321.
15. Matsuno S. , Kajino F., Kawashima Y. et al. // Phys. Rev. 1984. **D29**. P. 1.
16. Khalchukov F.F., Malgin A.S., Ryazhskaya O.G. et al. // Proc. 19th ICRC. La Jolla, 1985. **8**. P. 12.
17. Bogdanov A.G., Kokoulin R.P., Novoseltsev Yu.F. // arXiv:0911.1692v1[astro-ph.HE]. 9 Nov 2009.
18. Байбурина С.Г., Борисов А.С., Гусева З.М. и др. Взаимодействия адронов космических лучей сверхвысоких энергий (эксперимент «Памир»). М., 1984. (Труды Физического института им. П.Н. Лебедева. **154**. С. 3.)
19. Ракобольская И.В., Коненкин В.В., Манагадзе А.К. и др. Особенности взаимодействий адронов космических лучей сверхвысоких энергий (по данным рентгено-эмulsionных камер эксперимента «Памир»). М., 2000.
20. Kopenkin V.V., Managadze A.K., Rakobolskaya I.V., Roganova T.M. // Phys. Rev. D. 1995, **52**, N 5. P. 2766.
21. Managadze A.K., Osedlo V.I., Roganova T.M. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2007. **70**, N 1. P. 190.
22. Puchkov V.S., Borisov A.S., Denisova V.G. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2003. **122**. P. 263.
23. Zatsepin V.I., Lazareva T.V., Sazhina G.P., Sokol'skaya N.V. // Phys. Atom. Nucl. 1994. **57**, N 4. P. 645.
24. Apanasenko A., Derbina V.A., Galkin V.I. et al. (RUNJOB Collaboration) // Astropart. Phys. 2001. **6**, N 16. P. 13.
25. Derbina V.A., Galkin V.I., Hareyama M. et al. // Astrophys. J. 2005. **628**. P. L41.
26. Публиченко П.А., Дербина В.А., Галкин В.И. и др. (RUNJOB Collaboration) // Изв. РАН. 2002. **66**. С. 1627.
27. Манагадзе А.К., Оседло В.И., Галкин В.И. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2002. № 3 [112]. С. 5.
28. Armesto N., Borghini N., Jeon S. и др. // J. Phys. G: Nucl. and Part. Phys. 2008. **35**, N 5. P. 1.
29. Pontecorovo B. // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1958. **34**. P. 870.
30. Galkin V.I., Roganova T.M., Sazhina G.P. et al. (OPERA Collaboration) // New J. Phys. 2006. **8**. P. 303.
31. Acquafredda R., Adam T., Agafonova N. et al. (OPERA Collaboration) // J. Instr. 2009. **4**, N 4. P. 18.

## Results of cosmic ray experiments using emulsion chambers

I. V. Rakobol'skaya<sup>1,a</sup>, T. M. Roganova<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>*Department of Space Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

<sup>2</sup>*D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

E-mail: <sup>a</sup>nlinde@mail.ru, <sup>b</sup>rogatm@yandex.ru.

The results of experiments with X-ray chambers carried out for recent 40 years in the D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP) of the Moscow State University (MSU) are reviewed. Wide-ranging experiments on cosmic rays study by that method were started in SINP of MSU in 1968 by active support of Sergei Nikolaevich Vernov, whose 100th birth anniversary has to be observed in 2010. Eventually there were performed the most extensive measurements of cosmic ray muon spectra, investigations of interaction characteristics of super high energy hadrons in Pamir experiment, there were obtained the data on mass composition of primary cosmic rays in stratospheric experiments. The authors of this paper participated in accomplishment of these experiments and in analysis of the obtained data. The experience accumulated for many years of the work with emulsion materials is used now in OPERA experiment on neutrino oscillation study.

*Keywords:* cosmic rays, interactions with matter, cosmic rays spectrum, muons, neutrino.

PACS: 96.50.Vj.

Received 15 January 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

### Сведения об авторах

1. Ракобольская Ирина Вячеславовна — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор-консультант; тел.: (495) 939-09-03, e-mail: nlinde@mail.ru.
2. Роганова Татьяна Михайловна — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., зав. лабораторией; тел.: (495) 939-36-82, e-mail: rogatm@yandex.ru.