

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

**МАНАГАДЗЕ Александр Константинович**

**ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНЫХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ  
СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва - 2010

Работа выполнена в Отделе излучений и вычислительных методов Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук **Калмыков Н.Н.**  
(ОЧСВЭ НИИЯФ МГУ)

доктор физико-математических наук **Петрухин А.А.**  
(МИФИ)

доктор физико-математических наук **Ройзен И.И.**  
(ФИ РАН)

**Ведущая организация:** Институт ядерных исследований РАН

Защита состоится «\_3\_» \_\_декабря\_\_ 2010 г. в 15.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы д.1, стр.5 («19-й корпус НИИЯФ МГУ», ауд. 2-15).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан «\_26\_» \_\_октября\_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь совета  
по защите докторских и кандидатских  
диссертаций Д 501.001.77  
доктор физ.-мат.наук  
профессор

Страхова С.И.

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Космические лучи в течение нескольких последних десятилетий используются как источник частиц сверхвысоких энергий, позволяющих получать данные о характеристиках адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий в области энергий, невозпроизводимых в лабораторных условиях.

Хотя энергетическая граница, достижимая на ускорителях, смещалась в сторону высоких энергий за последние полвека со значительной скоростью, достаточно достоверной модели взаимодействия при сверхвысоких энергиях нет до сих пор. Запуск Большого адронного коллайдера (Large Hadron Collider) со временем позволит изучать энергии до  $10^{17}$  эВ, но в экспериментах на коллайдерах наиболее быстрые вторичные частицы могут не регистрироваться с уверенным разрешением. В то же время исследования взаимодействий, рассматривающие гамма-адронные семейства в космических лучах, связаны именно с областью фрагментации.

Исследование процессов множественной генерации во взаимодействиях адронов с ядрами при энергиях свыше  $10^{16}$  эВ актуально в космических лучах хотя бы из-за возможности получить важные целеуказания для экспериментов на ускорителях. Такие исследования могут быть проведены путем анализа характеристик различных компонент ядерно-электромагнитных каскадов (ЯЭК) в атмосфере.

В 1970-х годах возник новый метод исследования КЛ с помощью эмульсионных камер. Рентгеновские эмульсии (и только они) позволяли исследовать стволы широких атмосферных ливней (объекты в пределах нескольких десятков см), содержащие самые высокоэнергичные частицы ядерно-электромагнитного каскада, несущие уникальную информацию о фрагментационной области ядерного взаимодействия первичной частицы КЛ. Высокогорные эмульсионные эксперименты давали нигде более не достижимое сочетание больших площадей и большого времени экспозиции, необходимых для набора статистики, с одной стороны и очень подробного ( $\sim 100$  мкм) разрешения для выделения треков отдельных частиц с другой стороны.

С появлением в экспериментах нового класса высокоэнергичных событий, так называемых суперсемейств, встала задача разработки способов анализа таких

взаимодействий. Возникли дополнительные сложности, связанные с особенностями воспроизведения фотоэмульсией таких объектов (явление гало, перекрывание близкорасположенных каскадов). Кроме того, такие события являются достаточно редкими, в связи с чем иногда требовался и методически индивидуальный подход к анализу некоторых из них. Таким образом необходимо было существенное развитие методов анализа высокоэнергичных семейств, что и позволило получить ценную информацию о том, что происходит при взаимодействиях сверхвысоких энергий, и обнаружить особенности взаимодействий, не укладывающиеся в рамки стандартных представлений.

## **Цель работы**

Целью данной работы являлась разработка методов анализа гамма-адронных семейств космических лучей сверхвысоких энергий ( $10^{15} - 10^{17}$  эВ), зарегистрированных эмульсионными камерами, и получение информации о некоторых характеристиках ядерного взаимодействия при таких энергиях (в первую очередь о пространственных и пространственно-энергетических характеристиках), а также анализ необычных черт, присущих таким событиям: гало и выстроенности вдоль прямой линии высокоэнергичных объектов в семействе.

## **Новизна основных результатов**

**1.** Предложен новый подход к изучению явления выстроенности в семействах: анализ энергетически выделенных центров (ЭВЦ).

Этот подход, выделяя потоки частиц ЯЭК в воздухе и объединяя в совместном анализе производные заряженных и нейтральных частиц из акта взаимодействия, позволил увеличить на порядок статистику привлекаемых экспериментальных событий и установить наличие энергетического порога и ход энергетической зависимости явления.

**2.** При анализе нового физического феномена, компланарного разлета вторичных частиц в ядерном взаимодействии, выражающегося в выстроенности объектов вдоль прямой линии в плоскости регистрации, были получены следующие существенные результаты:

а) Впервые проведенные с использованием искусственных модельных семейств расчеты фоновой (случайной)

выстроенности и варьирование критериев отбора выстроенных событий позволили надежно установить существование самого явления и оптимальные способы его анализа.

б) Впервые была проанализирована зависимость доли выстроенных событий от энергии семейства и установлен энергетический порог этого явления – около  $10^{16}$  эВ.

в) Показано, что эффект выстроенности ЭВЦ в гамма-адронных семействах наилучшим образом среди всех интегральных характеристик семейств коррелирует с числом адронов в семействе  $N_h$  (эффект растет с ростом  $N_h$ ).

г) Впервые проведенный анализ взаимодействий при ускорительных энергиях (250 ГэВ) и в стратосферном эксперименте в одиночных взаимодействиях в энергетическом диапазоне  $10^{12}$  –  $10^{14}$  эВ продемонстрировал отсутствие эффекта компланарного разлета, подтвердив пороговый по энергии характер наблюдаемого эффекта и правильность определения уровня фона в расчетах, проведенных по модельным семействам.

д) Установлено наличие не искаженного атмосферой эффекта компланарного разлета наиболее энергичных частиц в “чистом” взаимодействии частицы КЛ с энергией  $E_0 > 10^{16}$  эВ (уникальное стратосферное гамма-адронное суперсеме́йство «СТРАНА»), что служит важным подтверждением существования феномена выстроенности и оценки величины энергетического порога (около  $10^{16}$  эВ).

**3.** Впервые экспериментально установлены факты, подтверждающие предполагаемую связь феномена выстроенности с большими значениями поперечных импульсов в соответствующих актах ядерных взаимодействий: показано, что при  $E_0 > 10^{16}$  эВ наблюдается корреляция наличия эффекта компланарного разлета и больших поперечных импульсов  $p_t$  частиц семейства. Значение  $\langle p_t \rangle$  в таком взаимодействии превышает 2.5 ГэВ/с и может составлять более 10 ГэВ/с.

**4.** Впервые показано, что за формирование гало суперсеме́йств могут отвечать чисто электромагнитные процессы: каскады от высокоэнергичных гамма-квантов, возникших в ядерном акте на соответствующей высоте над установкой.

**5.** Развита метод анализа продольного и поперечного развития электромагнитного гало в глубокой многослойной камере, позволяющий проводить оценку высоты образования над установкой и энергии частицы, ответственной за образование гало.

**6.** Впервые была получена расчетная оценка вероятности случайной выстроенности для нескольких центров электромагнитных гало.

Впервые была обнаружена выстроенность центров гало при проекции координат гало электромагнитного и адронного происхождения, регистрируемых на различных глубинах в камере, на одну плоскость.

**7.** Созданы оригинальные алгоритмы и программы для расчетов, необходимых при анализе суперсемейств, с учетом регистрации объектов на пленке.

## **Научная и практическая ценность работы**

Представлена новая информация о характеристиках ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях ( $> 10^{15}$  эВ).

На разнообразном экспериментальном материале доказано существование и проведен разносторонний анализ нового физического явления — компланарного разлета вторичных частиц при энергиях  $> 10^{16}$  эВ.

Обнаружено резкое увеличение средних  $p_t$  при сверхвысоких энергиях, сопровождающее явление компланарного разлета. Оценена величина таких поперечных импульсов.

Исследован механизм образования гало и его возможные конфигурации.

Созданы оригинальные алгоритмы и программы, нацеленные на анализ суперсемейств космических лучей, регистрируемых эмульсионными камерами (моделирование регистрации гало в камере, расчеты прохождения ЭФК через атмосферу и камеру, программы учета перекрытия ЭФК). Некоторые из этих программ были использованы в работе сотрудничества эксперимента “Памир”.

Результаты данной работы могут быть весьма полезны при планировании экспериментов по изучению пространственно-энергетических характеристик ядерного взаимодействия на современных ускорителях (прежде всего, на Большом адронном коллайдере LHC).

## **Достоверность результатов**

Достоверность результатов диссертации обеспечивается подтверждением их данными других отечественных и зарубежных исследователей, а также использованием известных и принятых в научном сообществе программ моделирования ядерно-электромагнитных процессов.

## **Личный вклад автора**

Диссертация является результатом многолетних исследований, проводимых в отделе излучений и вычислительных методов НИИЯФ МГУ при определяющем вкладе автора. Оригинальные алгоритмы и программы для расчетов по проблеме гало были созданы автором. Бóльшая часть расчетов осуществлена автором. Автором предложен новый подход к изучению явления выстроенности, обеспечивший необходимый прогресс в этом вопросе. Анализ экспериментальных данных проводился также с использованием авторских идей. Бóльшая часть публикаций по теме диссертации подготовлена и написана автором. Автор участвовал в работе Памирской экспедиции, был начальником Памирской группы НИИЯФ МГУ, около 20 лет являлся членом сотрудничества «Памир», был соавтором около 150 публикаций сотрудничества.

## **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертации докладывались на протяжении последних 30-ти лет на 10-ти Международных конференциях по космическим лучам, на 6-ти Всесоюзных (Всероссийских) конференциях по космическим лучам, на 4-х Международных симпозиумах по исследованию космических лучей высоких энергий, на многих рабочих совещаниях сотрудничества «Памир», на семинарах НИИЯФ МГУ, ФИАН, ИЯИ РАН, Лодзинского Университета (Польша), Университета Васеда (Япония).

## **Публикации**

На тему диссертации опубликовано 38 работ, из них 1 монография, 22 статьи в реферируемых журналах (из них 17 работ в журналах, рекомендуемых ВАК).

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 243 стр., в том числе 101 рисунок, 12 таблиц, список цитируемой литературы включает 184 наименования.

## Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели работы, описывается ее новизна и научная и практическая ценность, характеризуется личный вклад автора и достоверность полученных результатов. Здесь же приведены апробации результатов работы и краткие данные о публикациях.

В **первой главе** подробно описана методика работы с рентгеноэмульсионными камерами (РЭК) памирского эксперимента, к которой очень близки и методы работы с рентгеновскими пленками, экспонированными на баллонах.

Здесь введены основные понятия о семействах космических лучей, являющихся основным объектом исследований в данной работе. Гамма-адронными семействами или просто семействами называют группы высокоэнергичных генеалогически связанных частиц, чьи характеристики отражают в той или иной степени свойства породившего их ядерного взаимодействия. Если наблюдаемая суммарная энергия вторичных гамма-квантов ( $\Sigma E_\gamma$ ) в семействе превышает 500–1000 ТэВ, то такие объекты называются "суперсемействами".

В главе содержится информация о конструкции и об экспозиции памирских РЭК\*), описана регистрация камерами электромагнитных частиц и адронов, связь между плотностью вторичных электронов от развивающегося в веществе камеры электронно-фотонного каскада и потемнением пятна на пленке. Обрисованы принципы отбора изучаемых каскадов и идентификации частиц (адроны или гамма-кванты), изложена методика определения энергии падающих на камеру частиц для РЭК, приведены способы введения различных методических поправок при определении энергии. Указана роль необходимых теоретических расчетов при работе методом РЭК.

Отмечено, что в данной работе используется в основном материал из глубоких свинцовых РЭК, с которыми работала памирская группа НИИЯФ МГУ.

---

\*) Глубокие свинцовые РЭК состоят из сантиметровых слоев свинца, переслоенных рентгеновскими пленками, типичная глубина — 60 см. Углеродные С-камеры — это две тонкие свинцово-рентгеноэмульсионные стопки, разделенные 60 см углерода.



В этой же главе обсуждается проблема учета перекрывания близлежащих каскадов (ЭФК) на пленке и кратко изложена разработанная автором методика и схема расчетов для решения такой задачи как в терминах числа вторичных электронов, так и в терминах потемнений  $D$ . Алгоритм является оригинальным и представляет собой численное решение методом итераций системы  $n$  уравнений с  $n$  неизвестными. При этом члены уравнений содержат сложные функциональные зависимости искомого истинного  $N_e$  или истинного  $D$  от энергии частицы  $E$ , глубины наблюдения в камере  $t$ , расстояния  $L$  и радиуса круга измерительной диафрагмы  $R$ .

Разработанная автором методика учета перекрывания ЭФК широко использовалась в работе сотрудничества "Памир".

**Вторая глава** посвящена анализу явления гало при регистрации суперсемейств в РЭК. В центре таких семейств часто наблюдается область повышенного фона в рентгеновской пленке — "гало" (или ореол) — диаметром от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров и являющаяся результатом засветки пленки плотным потоком частиц (с суммарной энергией иногда более нескольких сотен ТэВ), образованным в слое воздуха над камерой.

При регистрации первых событий с гало физики не понимали причин возникновения этого явления. Строились разнообразные гипотезы новых "экзотических" механизмов в ядерном взаимодействии (например, гипотеза об акте с высокой множественностью). Надо было понять, можно ли объяснить гало в рамках обычной физики, базирующейся на экстраполяции ускорительных данных, или необходимы "катастрофические" нарушения в спектре рождаемых вторичных частиц и их множественности.

Для образования гало необходима концентрация большого потока энергии на пленке в круге от нескольких мм до нескольких см. При этом диссипация энергии может осуществляться множественным рождением адронов, но гораздо более эффективным механизмом является электромагнитный каскад. Энергия каждой частицы, падающей на установку, может быть ниже порога регистрации индивидуальной частицы в пленке, но суммарный эффект подпороговых частиц обуславливает появление гало достаточно большой площади. При взаимодействии ядер образуется много адронов, таким образом также может быть достигнута необходимая плотность энергии на обширной площади. Но вероятность зарегистрировать семейство большой энергии от тяжелого ядра весьма низка, т.к. при этом необходимо иметь первичное ядро с огромной энергией.

Вероятность генерации суперсемейств протонами во много раз выше.

Представляется естественным, что роль подпороговых квантов в образовании гало возрастает с энергией семейства. Таким образом, количественное нарастание эффектов (повышенный фон и перекрывание ЭФК) приводит к качественно новому для наблюдателя явлению (гало) при росте энергии семейства.

Для выяснения роли чисто электромагнитных процессов в образовании гало в рамках каскадной теории были проведены аналитические расчеты прохождения ЭФК от высокоэнергичных гамма-квантов через атмосферу и вещество камеры.

Из Таблицы 1 видно, что действительно в соответствующем диапазоне  $E_0$ ,  $\tau_{возд.}$ ,  $R$  и порогов  $E_{пор.}$  может реализоваться случай передачи значительной доли энергии первичной частицы в гало. По форме пространственного распределения такие расчеты также хорошо согласовались с экспериментальными данными.

**Таблица 1.** Вклад (%) в число электронов в круге радиуса  $R$  на глубине  $\tau_{р\gamma} = 10$  к.е. в камере от числа частиц, имеющих на границе установки энергию ниже  $E_{пор.}$  в ЭФК с исходной энергией  $E_0 = 1000$  ТэВ и разными высотами зарождения над установкой  $\tau_{возд.}$

R, мм	$E_{пор.}$ , ТэВ	$\tau_{возд.}$ , к.е.				
		2	4	6	8	12
5	2	12	26	35	43	50
	5	23	40	55	62	70
	8	30	52	65	72	80
20	2	16	35	50	60	68
	5	28	50	67	75	85
	8	36	59	76	92	90

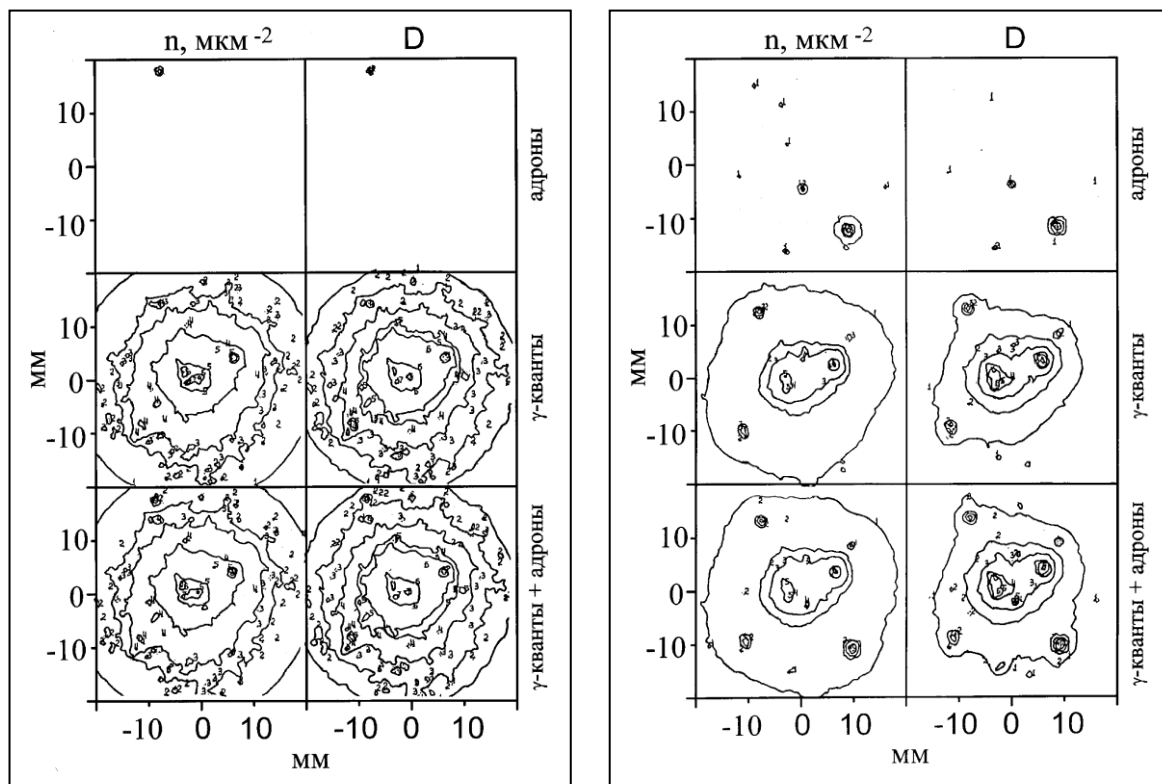
Следующим шагом стали расчеты по моделированию прохождения искусственных гамма-адронных суперсемейств через вещество камеры. В качестве исходных воздушных семейств были использованы искусственные события [1, 19], полученные для высоты Памира с использованием принятой на тот момент модели акта ядерного взаимодействия скейлингового типа, обеспечивающей эффективный канал образования в ЯЭК выделенных по энергии высокоэнергичных гамма-квантов вследствие распада  $\pi^0$ -мезонов, родившихся в акте взаимодействия с большим фейнмановским  $x_F$ . В современных моделях ядерного взаимодействия вероятность рождения высокоэнергичных гамма-квантов несколько меньше, но сам исследуемый здесь механизм образования гало остается тем же.

Моделировалось прохождение ЭФК от частиц, упавших на установку, через вещество камеры и на уровне наблюдения строилась карта плотностей вторичных электронов  $n$  или потемнений  $D$  с использованием специально разработанных оригинальных алгоритмов.

Достоинствами проведенного моделирования являлись:

- а) применение функций пространственного распределения в свинце, справедливых до больших (несколько см) расстояний;
- б) учет эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала при прохождении высокоэнергичных гамма-квантов (электронов) через камеру;
- в) визуальное отображение в картах плотностей структуры событий с любой степенью подробности;
- г) возможность отдельного изучения вклада гамма-квантов и адронов (или любых подклассов частиц) в гало и вообще в картину, наблюдаемую на пленке.

При этом специальные авторские разработки алгоритма позволили примерно в 10 раз уменьшить затраты машинного времени, что и позволило провести достаточно обширные симуляции картин гало (см. Рис. 1) при том, что в их создании участвовало огромное количество частиц, упавших на камеру в составе воздушного ЯЭК.



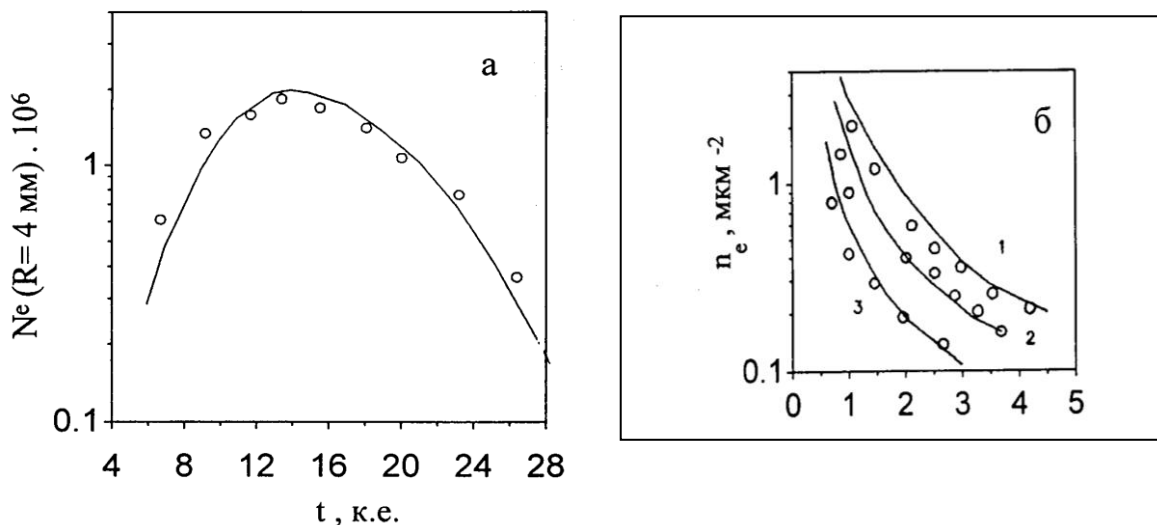
**Рис. 1.** Искусственное семейство № 3020,  $E_0 = 30$  ПэВ,  
а) —  $t = 10.6$  к.е., б) —  $t = 20.1$  к.е.

Изоденсы:  $n$  — плотность вторичных электронов,  $D$  — потемнение.

Анализ искусственных суперсемейств позволил в частности оценить вклад адронов в гало и установить, что адронные гало (наблюдаемые в глубине камеры) обусловлены просто развитием ЯЭК в веществе камеры от высокоэнергичного адрона.

Проведенные модельные расчеты показали также, что в предположении чисто скейлингового канала взаимодействия расчетное значение интенсивности семейств с гало и расчетное соотношение семейств с гало и без гало заметно завышены по сравнению с экспериментом. Это заставило предполагать, что необходимо изменение модели в сторону увеличения сечения взаимодействия за счет перераспределения долей мягких и жестких процессов (т.е. роста сечения в области малых фейнмановских  $x_F$ ). При этом характерная для скейлинга высокая вероятность рождения высокоэнергичных гамма-квантов не исчезает полностью, т.е. скейлинговый вид спектра в области больших  $x_F$  «проседает», но сохраняется.

В рамках анализа развития гало в глубоких свинцовых камерах было обработано 15 экспериментальных гамма-адронных семейств с  $\Sigma E_\gamma \geq 500$  ТэВ, в 13 из них обнаружены одно или несколько гало различных размеров.



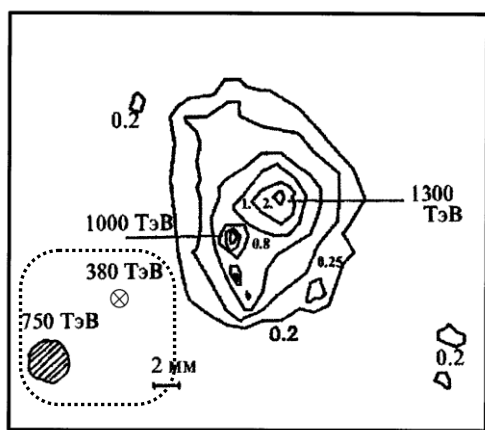
**Рис. 2.** Электромагнитное гало в семействе Pb-6001: а) — продольное развитие гало (О — эксперимент, ———— расчетная кривая для воздушно-свинцового ЭФК от гамма-кванта с энергией  $E_0 = 800$  ТэВ, родившегося на высоте  $t_{\text{возд.}} = 3$  к.е. над камерой); б) — пространственное распределение вторичных электронов в гало (О — эксперимент, ———— расчет для  $E_0 = 800$  ТэВ,  $t_{\text{возд.}} = 3$  к.е.); глубины регистрации в свинце: 1 —  $t = 12.8$  к.е., 2 —  $t = 19.3$  к.е., 3 —  $t = 6.4$  к.е.

На основе выполненных автором расчетов и имеющихся данных из глубоких (что важно) камер был разработан метод анализа продольного и поперечного развития гало в камере, позволяющий оценивать энергии и высоты образования над установкой частицы, ответственной за образование гало.

Для памирских семейств получен эффективный диапазон высот зарождения частиц, ответственных за гало,  $\tau_{\text{возд.}} = 4 \pm 3$  к.е. (или  $2 \pm 1.5$  км для Памира) над установкой при энергиях этих квантов в диапазоне 200 – 2500 ТэВ.

**Третья глава** диссертации посвящена феномену выстроенности, т.е. расположению объектов в семействе вдоль прямой линии в плоскости мишенной диаграммы, что соответствует компланарному разлету частиц в ядерном взаимодействии и представляет собой новое, не предсказываемое ранее явление. Впервые этот феномен был обнаружен памирским сотрудничеством в виде выстроенности структур многоцентровых гало в гамма-семействах в 1984 г. [20], после чего в течение нескольких лет не удавалось достичь прогресса ни в исследовании этого явления, ни в существенном увеличении экспериментальных свидетельств его.

Подробный анализ конфигураций и структур многоцентровых гало в искусственных (наигранных по модели MSF [21]) и экспериментальных семействах, проведенный для различных глубин наблюдения в камере  $t_{\text{Рb}}$  и для различных фиксированных уровней потемнения  $D$  гало на пленке, показал, что отсутствие или наличие эффекта выстроенности сильно зависит и от фиксированного уровня  $D$  выделения структур гало, и от глубины наблюдения в камере.



**Рис. 3.** Объединение электромагнитной и адронной компонент на мишенной диаграмме центральной области семейства Рb-45 дает выстроенную конфигурацию 4-х наиболее энергичных объектов (ЭВЦ) в семействе:

⊙ – адронное гало, ⊗ – адрон, глубина  $t = 37$  к.е., линии изображают изоденсы электромагнитного гало на глубине наблюдения  $t = 9.2$  к.е.; цифры на диаграмме указывают энергию объектов (ЭВЦ) в ТэВ; цифры у изоденс – уровень потемнения  $D$ .

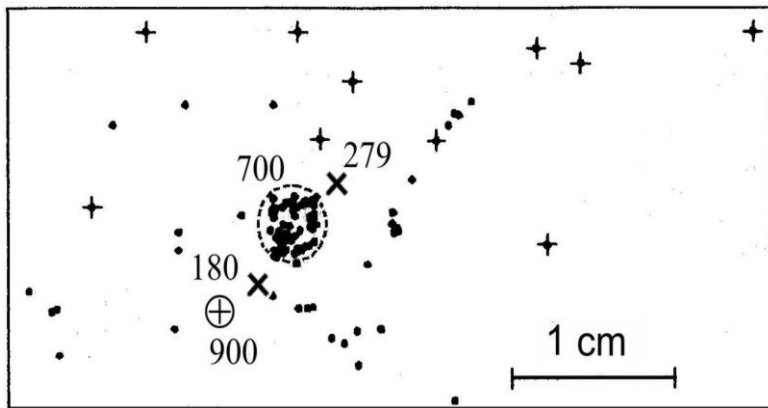
Таким образом, появилась идея объединить в рассмотрении (см. Рис. 3) на мишенной диаграмме информацию со всех слоев глубокой камеры.

Была сформулирована идея анализа ЭВЦ — энергетически выделенных центров (или объектов) семейства, сыгравший важнейшую роль в последующем исследовании феномена выстроенности. Такой подход выдвигал на первый план не природу или внешний вид различных объектов в семействе, а их

энергию, после чего разнородные объекты семейства можно анализировать совместно.

ЭВЦ включают в себя:

- 1) гало или отдельные центры (подструктуры) многоцентровых гало;
- 2) гамма-кластеры, т.е. тесные группы гамма-квантов;
- 3) отдельные, изолированные от гало и кластеров, наиболее энергичные гамма-кванты в семействе;
- 4) наиболее энергичные адроны в семействе (в частности, адронные гало).



**Рис. 4.** Мишенная диаграмма гамма-адронного суперсемейства Pb-6.

+ — адроны, • — гамма-кванты, x — наиболее высокоэнергичные адроны, ⊕ — адронное гало, ⊗ — электромагнитное гало. Цифры около 4-х наиболее энергичных объектов суперсемейства указывают их энергию в ТэВ.

При этом для адекватного совместного рассмотрения обеих компонент семейств энергия  $E_n^{(\gamma)}$ , выделяемая адронами в гамма-компоненту в камере, должна быть поправлена на  $\langle k_\gamma \rangle$  (обычно берется  $\langle k_\gamma \rangle \approx 1/3$ ).

В гамма-кластеры гамма-кванты объединяются по специальным критериям согласно процедуре декаскадирования электромагнитных частиц семейства [22].

После выделения в семействе таких объектов, относящихся к одному из 4-х указанных типов, следует оставить только один признак — энергию — и анализировать далее наиболее высокоэнергичные из них. Можно сказать, что это анализ энергетически выделенных потоков частиц в ядерно-электромагнитном каскаде, образующем данное гамма-адронное семейство. Пример мишенной диаграммы с ЭВЦ в экспериментальном событии с выстроенностью показан на Рис. 4.

При таком подходе можно равноправно рассматривать и семейства малых энергий, где в состав ЭВЦ входят только отдельные гамма-кванты и адроны, и суперсемейства, где ЭВЦ представляют собой обычно гало, гамма-кластеры, адроны и очень редко отдельные гамма-кванты.

Таким образом появилась возможность применить единый подход в анализе на выстроенность для семейств в широком диапазоне энергий.

Этот новый подход дал возможность увеличить в 10 и более раз статистику экспериментальных и расчетных событий, используемых для анализа выстроенности, а также проследить энергетическую зависимость эффекта.

В качестве критерия выстроенности используется параметр асимметрии  $\lambda$ :

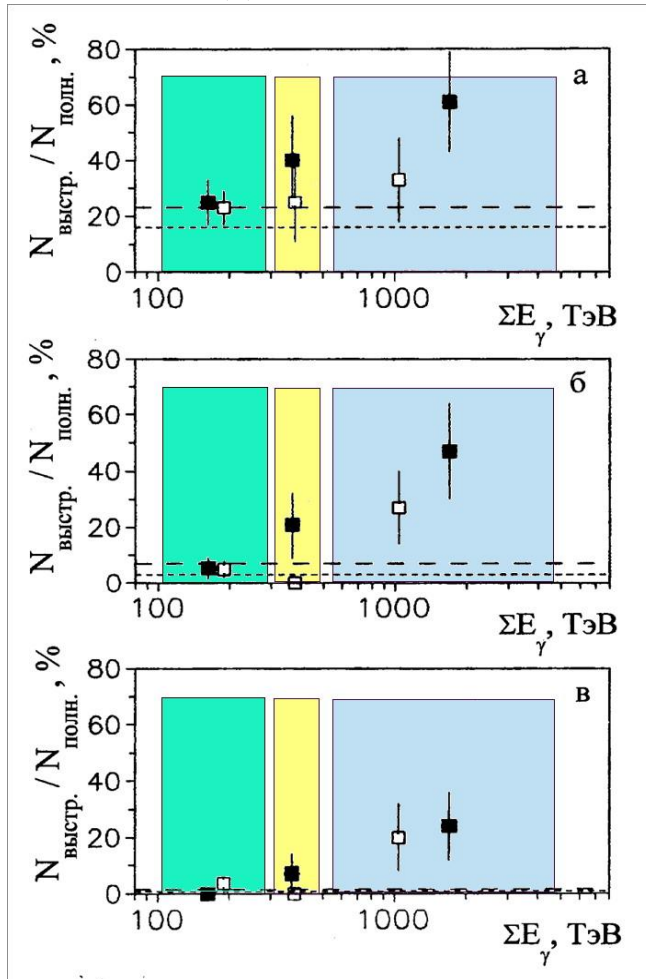
$$\lambda_N = \frac{\sum_{i \neq j \neq k}^N \cos(2\varphi_{i,j,k})}{N(N-1)(N-2)},$$

где  $\varphi_{i,j,k}$  — угол между векторами  $\vec{k}_i$  и  $\vec{k}_j$ ;  $N$  — число рассматриваемых точек. Параметр  $\lambda_N$  достигает 1 в случае расположения точек вдоль одной прямой линии и стремится к  $-1/(N-1)$  в случае изотропного распределения точек на плоскости. Этот параметр характеризует именно расположение  $N$  точек вдоль прямой линии, в то время как другие известные параметры характеризуют анизотропию или эллиптичность в расположении ансамбля точек, т.е. скорее вытянутость, чем выстроенность вдоль прямой линии.

Для верного суждения о феномене выстроенности была оценена случайная фоновая выстроенность в искусственных семействах (модель MSF, где не заложены какие-либо специальные механизмы анизотропии). Первоначально в сотрудничестве «Памир» выстроенными считались события с  $\lambda_3 > 0.6$ . Но этому критерию соответствует, как было обнаружено, высокий уровень фоновой случайной выстроенности (около 32 % по модельным расчетам). Варьируя число точек или ЭВЦ, взятых для анализа выстроенности в одном семействе (3, 4, 5 и более), а также пороговое значение критерия  $\lambda_m$ , удалось установить, что оптимальным критерием выделения событий с выстроенностью является  $\lambda_4 \geq 0.8$ . Доля фоновых событий со случайной выстроенностью при таком критерии отбора составляет 6-8 % по искусственным семействам и 3% для случайно брошенных точек.

На статистике 73 семейств с  $\Sigma E_\gamma = 100 - 5000$  ТэВ из памирского банка данных Pb-камер было исследовано, как изменяется доля выстроенных событий в зависимости от энергии события  $\Sigma E_\gamma$  (т.е. суммарной энергии гамма-компоненты в семействе с порогом 4 ТэВ) для различных компонент семейств. Рассматривались отдельно только гамма-кванты, затем только гамма-кластеры, затем только адроны и, наконец, ЭВЦ, включающие в себя три упомянутых типа объектов и гало.

Доля семейств с выстроенными гамма-квантами в разных диапазонах по  $\Sigma E_\gamma$  практически не меняется и не сильно отличается от расчетного фона. Это неудивительно, так как электромагнитные частицы испытывают в воздухе до камеры сильное влияние каскадного процесса и ансамбль компланарных частиц не может долго сохраняться, даже если он и возникает в акте взаимодействия.



**Рис. 5.** Зависимость доли событий с выстроенными ЭВЦ среди гамма-адронных семейств от энергии семейства  $\Sigma E_\gamma$ :

- а) — для 3-х ЭВЦ в каждом семействе;
- б) — для 4-х ЭВЦ в каждом семействе;
- в) — для 5-ти ЭВЦ в каждом семействе.

Эксперимент: ■ — данные по глубоком свинцовым РЭК памирского эксперимента;  
□ — данные по углеродным камерам совместного российско-японского эксперимента на Памире;

Расчет: - - - - - расчет по MSF-модели; - - - - - для случайно брошенных точек.

Однако для гамма-кластеров и для адронов наблюдается рост доли выстроенных событий с увеличением  $\Sigma E_\gamma$ . Понятно, что свойства выстроенности для этих двух типов объектов схожи, т.к. гамма-кластеры фактически отражают родившиеся в акте  $\pi^0$ -мезоны, а адроны —  $\pi^\pm$ . Для ЭВЦ доля выстроенных событий в любом диапазоне по энергии выше, чем отдельно для гамма-квантов, гамма-кластеров или адронов. Это понятно, т.к. ЭВЦ отражают выстроенность всех вторичных частиц во взаимодействии, объединяя и нейтральные, и заряженные частицы, давая тем самым цельную картину, а не ее фрагменты по компонентам. Воздействие каскадного процесса, разрушающее выстроенность, при рассмотрении ЭВЦ минимизировано.

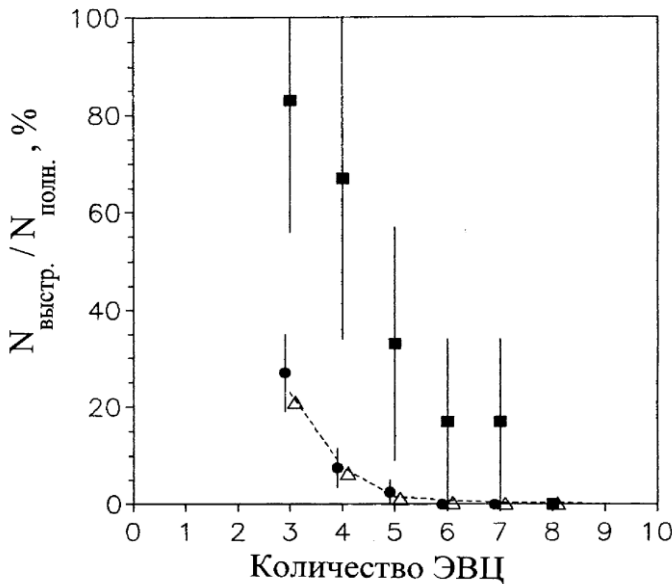
На рис. 5 видно, что доля выстроенных событий растет от фонового уровня при  $\Sigma E_\gamma = 100 - 300$  ТэВ до  $(61 \pm 18)$  % для 3-х ЭВЦ и до  $(47 \pm 17)$  % для 4-х ЭВЦ при  $\Sigma E_\gamma \geq 500$  ТэВ по данным



Pb-камер. Данные по углеродным C-камерам показывают такую же тенденцию, но рост эффекта менее выражен.

По оценке, сделанной в работе [23] с учетом всех данных и Pb-камер, и C-камер, совместная вероятность наблюдения явления выстроенности из-за обычных флуктуаций  $< 10^{-7}$ .

С энергией  $E_0$  семейства коррелирует не только  $\Sigma E_\gamma$ , но  $\Sigma E_{tot} = \Sigma E_\gamma + \Sigma E_h^{(n)}$ , а также множественности гамма-квантов и адронов  $N_\gamma$  и  $N_h$ , и зависимость эффекта выстроенности была прослежена и от этих параметров. Для всех трех параметров доля событий с выстроенностью растет с их увеличением, т.е. с ростом  $E_0$ . Особенно явный и большой рост выстроенности наблюдается в зависимости от  $N_h$ . При наибольших  $N_h$  доля выстроенных событий составляет  $(83 \pm 37) \%$  для 3-х ЭВЦ и  $(67 \pm 33) \%$  для 4-х ЭВЦ.



**Рис. 6.** Зависимость доли семейств с выстроенностью от количества рассматриваемых ЭВЦ в каждом семействе:

- расчет по модели MSF;
- — экспериментальные семейства из Pb-камер с  $N_h > 30$ ;
- — экспериментальные семейства из Pb-камер с  $N_h = 1-3$ ;
- △ — ускорительные данные при  $E_0 = 250$  ГэВ (эксперимент NA22).

Из Рис. 6 видно, что для семейств, обладающих  $N_h = 1 - 3$  (т.е. малоэнергичных семейств), доля выстроенных событий совпадает при всех  $N_{ЭВЦ}$  с расчетным фоном (его значение не зависит от энергии  $E_0$  и соответственно от  $N_h$ ). Для семейств же с  $N_h > 30$  эта доля (вероятность выстроенности) гораздо выше расчетного фона вплоть до  $N_{ЭВЦ} = 7$ . Здесь же показаны данные по доле выстроенных событий для банка данных эксперимента NA22 в ЦЕРНе ( $\pi$ -Au взаимодействие,  $E_0 = 250$  ГэВ, "мишенный" эксперимент). Эти значения замечательно согласуются с уровнем расчетного флуктуационного фона и данными по малоэнергичным семействам, что подтверждает и верность оценок случайной выстроенности по модельным расчетам, и пороговый характер эффекта выстроенности, наблюдаемого лишь при больших  $N_h$ , соответствующих большому  $E_0$ .

Существование эффекта выстроенности ЭВЦ было подтверждено и в других экспериментах. Прежде всего наличие самого явления и его зависимость от энергии, обнаруженные в

данных из глубоких свинцовых камер, подтверждаются данными из углеродных РЭК памирского эксперимента [24]. Изучение выстроенности в С-камерах в основном велось по гамма-компоненте семейств (т.е. анализировались гамма-кластеры и гамма-кванты, а также электромагнитные гало) [25].

Анализ гамма-адронных семейств на выстроенность по методике ЭВЦ был проведен также китайскими физиками на основе данных из глубоких железных рентгеноэмульсионных камер, экспонированных в Тибете на г. Канбала (или Кампала) на высоте 5200 м [26]. Доля событий с выстроенностью там составила  $(50 \pm 20) \%$ , что отличается от фонового значения 21 % (отбор производился по критерию  $\lambda_3 > 0.8$ ).

В работе [27] приведено уникальное событие, зарегистрированное на высоте 17 км (около 100 г/см<sup>2</sup>) рентгеноэмульсионной камерой, установленной на сверхзвуковом самолете "Конкорд". Это гамма-семейство с  $\Sigma E_\gamma \approx 1600$  ТэВ. Пять наиболее энергичных гамма-кванта с энергиями свыше 50 ТэВ по утверждению авторов являются выстроенными ( для 4-х квантов  $\lambda_4 = 0.9972$ ).

Стратосферный эмульсионный **эксперимент RUNJOB** [28] дал возможность проанализировать результаты ядерных взаимодействий первичных частиц КЛ внутри камеры. Камеры RUNJOB состояли из мишени, спейсера и свинцового калориметра. Вторичные частицы после взаимодействия первичной в камере имели возможность достаточно разойтись и дать отдельные следы в калориметре в ядерной эмульсии. Важной особенностью здесь явилась возможность определения энергии и типа первичной частицы. Энергетический диапазон изучаемых взаимодействий — от нескольких ТэВ до нескольких десятков ТэВ. В связи с методическими особенностями эксперимента RUNJOB выстроенность анализировалась отдельно для адронной и для гамма-компоненты (в случае наблюдения одного взаимодействия, а не каскадного процесса, картина возможной выстроенности гамма-квантов не разрушается, как в атмосферном ЯЭК).

Для оценки величины фоновой (т.е. случайной) выстроенности были проведены специальные серии расчетов с использованием современной модели ядерного взаимодействия QGSJET [29], в которой не заложено какого-либо специального механизма компланарного разлёта частиц. Расчеты показали, что доля событий со случайной выстроенностью не меняется практически в диапазоне первичных энергий 1 ТэВ — 20 ПэВ. Показано, что доля событий с выстроенностью в гамма-компоненте вторичных частиц одинакова для разных типов

первичных ядер и близка значению, полученному в расчетах, выполненных для памирских семейств, а доля событий со случайной выстроенностью в адронной компоненте выше для ядер, чем для первичных протонов. Это отличие невелико (около 30% для критерия  $\lambda_4$ ) и увеличивается для «сильных» критериев. При этом обычно используемая величина фоновой выстроенности, усредненная по ядрам, не изменяется существенным образом.

**Таблица 2.** Доля (в %) выстроенных событий по модельным расчетам и экспериментальным данным RUNJOB 95-96 г.г.

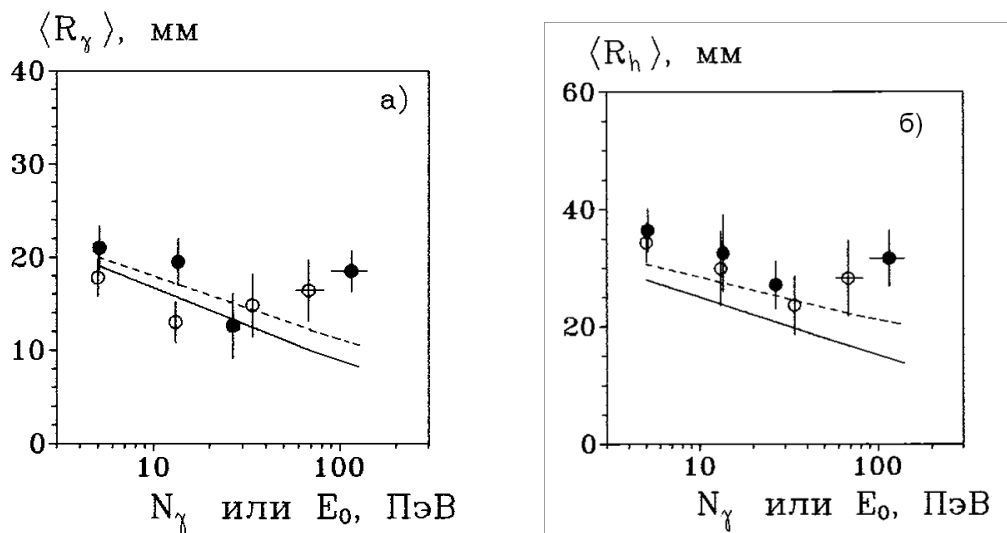
Крите- рий	Расчёт	Эксперимент	Расчёт	Эксперимент
	Гамма- компонента от первичного протона  (10 000 событий)	Гамма- компонента в эксперименте RUNJOB 95 и 96 $\Sigma E_\gamma > 3\text{ТэВ}$ (168 событий)	Адронная компонента от первичного ядра железа (10 000 событий)	Адронная компонента от всех первичных ядер ( $Z \geq 12$ ) RUNJOB 95 (14 событий)
$\lambda_3 > 0.8$	$22.3 \pm 0.5$	$23 \pm 4$	$27.0 \pm 0.5$	$29 \pm 14$
$\lambda_4 > 0.8$	$5.9 \pm 0.2$	$1.2 \pm 0.8$	$8.8 \pm 0.3$	$7 \pm 7$

Результаты анализа данных эксперимента RUNJOB представлены в Табл.2. Можно сделать вывод, что при  $E_0 = 10^{12} - 10^{14}$  эВ не выявлено существования эффекта выстроенности, что согласуется с представлениями сотрудничества «Памир» о пороговой энергии взаимодействия для этого феномена около  $10^{16}$  эВ.

В **четвертой главе** приводятся результаты анализа зависимости пространственных характеристик памирских гамма-адронных семейств от энергии события.

Для такого анализа были использованы 83 гамма-адронных семейства из Pb-камер с  $N_\gamma \geq 3$ ,  $N_h \geq 1$  и  $E_{\text{порог.}} = 10 \text{ ТэВ}$  (из них 6 особо высокоэнергичных суперсемейств с  $N_\gamma \geq 50$ ). Также для сравнения использовано 115 семейств, отобранных по тем же критериям из C-камер совместного Российско-Японского эксперимента на Памире и Японско-Бразильского сотрудничества на г. Чакалтайа, среди них 7 особо высокоэнергичных событий с  $N_\gamma \geq 50$ . Значение  $E_{\text{порог.}} = 10 \text{ ТэВ}$

было здесь использовано, чтобы избежать возможного методического влияния области гало в некоторых суперсемействах, где меньшее значение  $E_{\text{порог}}$  могло привести к искажениям значений пространственных характеристик. При этом оказалось, что  $N_\gamma$  отражает полную энергию семейства, численно приблизительно совпадая здесь с оценками энергии взаимодействия  $E_0$  в ПэВ.



**Рис. 7.** Зависимости средних величин радиальных расстояний частиц от центра семейства  $\langle R_\gamma \rangle$  для гамма-компоненты (а) и  $\langle R_h \rangle$  для адронной компоненты (б) от  $N_\gamma$  ( $E_\gamma > 10$  ТэВ) семейств. ● — данные из памирских глубоких свинцовых камер, ○ — данные из углеродных камер, - - - - расчеты по модели UA5, ——— расчеты по модели MSF.

Для сравнения среднего расстояния частиц семейства от его центра (см. Рис. 7) в эксперименте и в расчете использовались искусственные семейства, наигранные по моделям MSF (185 соб.) и UA5 (196 соб., базируется на экстраполяции ускорительных данных из одноименного эксперимента [30]). Видно, что расчеты по обеим моделям для этих характеристик весьма близки, хотя  $\langle r_t \rangle$  в модели UA5 в рассматриваемой области высоких энергий примерно в 1.5 раза выше, чем в MSF. Аналогичный анализ был проведен для величин  $\langle ER \rangle$ . Анализ показал, что до  $E_0 \approx 20-30$  ПэВ эксперимент достаточно хорошо описывается расчетом, при более высоких энергиях распределение частиц в экспериментальных событиях становится почти в 2 раза шире, чем в расчетах. Из сравнения  $\langle r_t \rangle$  в моделях MSF и UA5 ясно, что такое изменение не объясняется ростом  $\langle r_t \rangle$  в 1.5–2 раза.

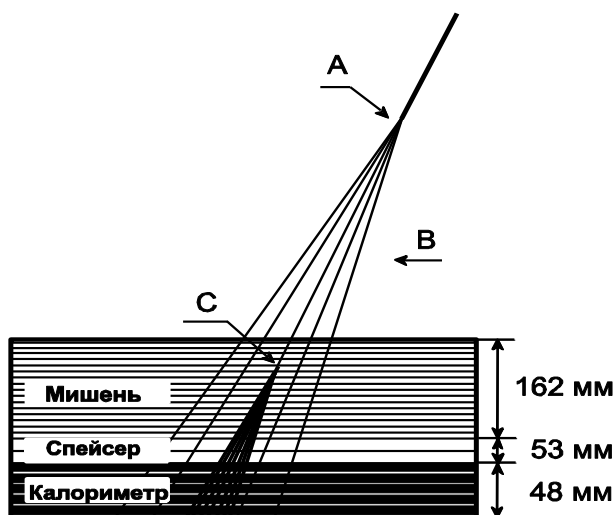
Возможны две причины расширения пространственного распределения частиц в семействах при переходе к энергиям свыше  $\approx 20-30$  ПэВ: резкое увеличение  $r_t$  частиц в ядерном взаимодействии или изменение массового состава падающих частиц первичного космического излучения (ПКИ).

Для объяснения существенно более широкого пространственного распределения, чем прогнозируемое на основе модельных расчетов,  $r_t$  должно быть увеличено приблизительно на порядок. Такой факт хорошо бы согласовался с выводами, вытекающими из исследования явления выстроенности.

Если же предположить, что рост значений пространственных характеристик происходит исключительно за счет изменения массового состава ПКИ, то такое изменение должно быть также весьма существенным. Например, по данным модели MSF характеристики  $\langle R \rangle$  и  $\langle ER \rangle$  для семейств от частиц с  $E_0 = 10 - 20$  ПэВ увеличиваются в 1.4 раза при переходе от протонов к  $\alpha$ -частицам и в 2 раза при переходе от протонов к ядрам железа (Fe).

Следует отметить, что указания на возможное увеличение ширины пространственного распределения в ЯЭК в атмосфере при энергиях свыше  $10^{16}$  эВ отмечались и в других экспериментах («Адрон» [31], ШАЛ + РЭК на г. Чакалтайа (Боливия) [32]).

**Пятая глава** диссертации посвящена анализу уникального стратосферного гамма-адронного суперсемейства «СТРАНА», представляющего собой единственный случай «чистого» ядерного взаимодействия с  $E_0 > 10^{16}$  эВ.



**Рис. 8.** Схема регистрации суперсемейства «СТРАНА» в эмульсионной камере. А — взаимодействие частицы ПКЛ, В — частицы воздушного гамма-адронного семейства, С — взаимодействие лидирующей частицы семейства.

Это суперсемейство было зарегистрировано группой ФИАН при полёте эмульсионной камеры на борту баллона-аэростата в 1975 году по трассе Камчатка – Поволжье на высоте 30-33 км [33], что соответствует толщине атмосферы  $\approx 10.2$  г/см<sup>2</sup>. Регистрирующая установка [34] представляла собой многослойную эмульсионную камеру (см. Рис. 8), содержащую ядерные эмульсии и рентгеновские пленки. Геометрическая

площадь детектора составляла  $40 \times 50$  см<sup>2</sup>. Камера состояла из трех основных блоков: мишенного, спейсера (пластик) и свинцового калориметра, суммарная толщина калориметра составляла 9 к.е., или 0.26 пробега ядерного взаимодействия.

Суперсемейство «СТРАНА» было переобработано нами с учетом накопленного за многие годы в сотрудничестве «Памир» опыта и современных модельных расчетов. В частности, переоценка энергии события дала существенно более высокое значение, чем ранее.

Учитывая условия регистрации данного события в стратосфере, можно полагать, что оно является результатом одиночного ядерного взаимодействия. Это существенно отличает данное суперсемейство от всех высокоэнергичных событий, регистрируемых установками на горах и являющихся результатом развития ЯЭК, и делает его уникальным примером взаимодействия при столь высокой энергии, достойным особого индивидуального анализа.

Суперсемейство «СТРАНА» состоит из 107 частиц, из них 76 являются электромагнитными (называемыми далее гамма-квантами) с суммарной энергией  $\sum E_\gamma = 1670$  ТэВ. Еще 30 частиц являются адронами с суммарной наблюдаемой энергией  $\sum E_h^{(n)} = 807$  ТэВ, и есть одна лидирующая частица, уносящая значительную долю всей энергии семейства. В центре события имеется небольшое гало. Зенитный угол падения семейства на камеру  $\theta = 30^\circ$ , что соответствует глубине регистрации в атмосфере  $11.5$  г/см<sup>2</sup>.

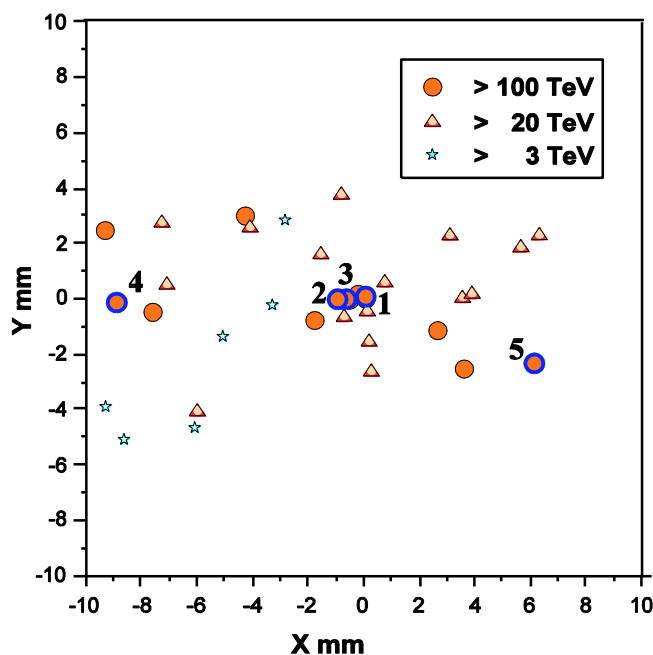
После введения поправок для адронов на эффективный  $\langle k_\gamma \rangle \approx 1/3$ , на эффективность регистрации адронов в камере  $\approx 40\%$  и на потери за счет обрезания краем пленки энергия воздушного семейства (без учета лидирующей частицы) будет составлять  $\sum E_\gamma + \{\sum E_h^{(n)}\}/k_{\text{эфф.}} \approx 0.92 \cdot 10^{16}$  эВ. Сходную оценку около  $10^{16}$  эВ дает и сравнение псевдобыстротного распределения частиц в семействе с модельными расчетами. Для оценки энергии лидирующей струи были проведены специальные расчеты развития подобной струи в веществе камеры. Из сравнения пространственных распределений треков в ядерных эмульсиях на разных уровнях в расчете и эксперименте был сделан вывод, что эксперимент достаточно хорошо описывается параметрами струи, рожденной протоном с энергией  $(1-2) \cdot 10^{15}$  эВ. Таким образом, полная энергия первичной частицы, породившей данное семейство, оценивается как  $(1.0 - 1.1) \cdot 10^{16}$  эВ.

Так же, как и для регистрации струи в ядерных эмульсиях, было промоделировано развитие изображения гало в рентгеновских пленках. Это моделирование включало описание

процессов в многослойной камере с помощью программы ECsim и использование модели QGSJET для ядерного взаимодействия. Подобное моделирование для гало и струи проведено впервые. Анализ показал, что пространственное распределение экспериментального гало не описывается полностью расчетными зависимостями ни в случае первичного протона, ни даже ядра гелия, а является более широким. Это частично объясняется вкладом других частиц — близлежащих высокоэнергичных адронов, а кроме того, как известно из исследований по гало, вклад в пространственное распределение гало могут давать малоэнергичные гамма-кванты (даже с энергией менее 2 ТэВ), упавшие на камеру из воздуха в достаточно большом количестве и не регистрируемые по отдельности.

Важнейшим моментом является **поиск явления выстроенности** в семействе «СТРАНА», т.к. пороговой энергией для полного проявления такого феномена по вышеприведенным оценкам и по данным Памирского сотрудничества является  $E_0 \approx 10^{16}$  эВ. Таким образом, это явление должно было быть обнаружено в данном случае чистого взаимодействия.

Результат рассмотрения выстроенности [26, 27] представлен на Рис. 9.



**Рис. 9.** Мишенная диаграмма центральной части суперсемейства «СТРАНА». Цифрами обозначены первые пять высокоэнергичных адронов. Показатели выстроенности для первых 3-х, 4-х и 5-ти частиц  $\lambda_3 = 0.98$ ,  $\lambda_4 = 0.99$ ,  $\lambda_5 = 0.90$ .

Если рассмотреть все семейство, то 15 из 107 частиц семейства расположены вблизи линии выстроенности. Эти 15 частиц несут более половины энергии первичной частицы космических лучей.

Для оценки фона случайных событий с выстроенностью были выполнены расчеты по модели QGSJET. С очень высокой статистикой (10000 событий) были наиграны взаимодействия для  $E_0 = 2 \cdot 10^{16}$  эВ/ядро. Была оценена вероятность отдельного

события с  $\lambda_3 \geq 0.98$ ,  $\lambda_4 \geq 0.99$ ,  $\lambda_5 \geq 0.90$ . Вероятность обнаружить подобное событие для семейств от первичного протона составляет 0.01% , для первичного ядра железа 0.03%.

Следует отметить, что на Рис. 9 видна выраженная анизотропия в расположении не только наиболее энергичных, но и всех частиц центральной части семейства. Поэтому возник интерес проанализировать конфигурацию центральной области данного события с использованием других параметров анизотропии, таких как  $a$ ,  $B$ ,  $T'$ , где:

$$\alpha_m = \frac{\sum_{i \neq j}^m \cos(2\varphi_{i,j})}{m(m-1)}, \quad B = 1 - \left\{ \frac{\sum E_i y_i^2}{\sum E_i x_i^2} \right\},$$

$$T' = \left\{ \frac{\sum_i [\xi_i \cos\psi]}{\sum_i [\xi_i \sin\psi]} \right\}, \quad \xi_{ij} = \frac{E_i E_j}{E_i + E_j} R_{ij}.$$

Результаты приведены в Табл. 3. Из таблицы видно, что экспериментальные значения всех параметров заметно превышают расчетные значения и выходят далеко за пределы возможных случайных флуктуаций, что говорит о выраженной анизотропии в расположении всех частиц в центральной зоне семейства «СТРАНА». Направление вытянутости анизотропно расположенных частиц совпадает с направлением выстроенности 5-ти наиболее энергичных адронов, т.е. при разлете эти вторичные частицы были распределены вблизи плоскости компланарного разлета.

**Таблица 3.** Значение параметров анизотропии для 33 частиц в центральной области семейства «СТРАНА» и аналогичные значения усредненных по наигранной статистике параметров из расчета по модели QGSJET.

<b>Исследуемый параметр</b>		<b><math>a</math></b>	<b><math>B</math></b>	<b><math>T'</math></b>
<b>Расчет для разных первичных ядер</b>	Протон P	0,014 ± 0,001	0,86 ± 0,003	2,75 ± 0,006
	Гелий He	0,013 ± 0,001	0,86 ± 0,003	2,70 ± 0,005
	Углерод C	0,018 ± 0,001	0,86 ± 0,003	2,73 ± 0,006
	Магний Mg	0,018 ± 0,001	0,86 ± 0,003	2,68 ± 0,005
	Железо Fe	0,044 ± 0,001	0,86 ± 0,003	2,74 ± 0,007
<b>Эксперимент</b>		<b>0,282</b>	<b>0,9999</b>	<b>3,21</b>



Тот факт, что суперсемейство «СТРАНА» является результатом одного ядерного взаимодействия в атмосфере, дает уникальную возможность попытаться определить высоту этого взаимодействия над камерой и, следовательно, оценить величины поперечных импульсов родившихся вторичных частиц. Это, в свою очередь, является особенно актуальным в связи с имеющимися предположениями о связи явления выстроенности с большими значениями  $p_t$  в акте взаимодействия.

**Оценка высоты взаимодействия** была проведена тремя различными методами.

Первый метод оценки высот взаимодействия основан на предположении, что при небольшом слое атмосферы над установкой **гамма-кванты от распавшихся  $\pi^0$ -мезонов** не должны испытать существенного электромагнитного размножения. В связи с небольшим временем жизни  $\pi^0$ -мезонов можно считать, что их распад произошел в точке самого ядерного взаимодействия. В этом случае, измерив энергии пары гамма-квантов  $E_i$  и  $E_j$  от распада одного  $\pi^0$ -мезона и расстояние на рентгеновской пленке в камере между этими квантами  $L_{ij}$ , можно оценить высоту взаимодействия  $H$ , используя известную формулу:  $m_{\pi^0} = \theta \sqrt{E_i E_j}$

Высота  $H$  определяется как  $H = L_{ij} / \operatorname{tg}\theta$ , где  $\theta$  — угол разлета гамма-квантов,  $m_{\pi^0} = 135$  МэВ.

В нашей работе [12] был специально разработан метод, базирующийся на анализе искусственных суперсемейств и позволяющий достаточно корректно оценивать высоту точки взаимодействия по распределению высот распада для всевозможных комбинаций пар гамма-квантов в семействе. Такое распределение аппроксимировалось функцией лог-нормального распределения  $p(x) = A \cdot \exp(-(\ln x - m)^2 / \sigma^2)$  и оценка  $\langle m \rangle$  параметра  $m$  принималась за оценку высоты  $H_{est}$  для рассматриваемого семейства. Из данных по ансамблю искусственных суперсемейств вычислялся поправочный коэффициент  $\langle k \rangle = H_{est} / H_{true}$ , связывающий значение оцененной и истинной высоты взаимодействия. Для семейства «СТРАНА» проведенная таким образом оценка высоты дала нам значение высоты  $H_{оцен.} = 1360$  метров. Используя поправочный коэффициент 1.15, получаем  $H_{истин.} = (1180 \pm 340)$  м.

Еще один возможный способ оценки высоты генерации семейства — это **анализ псевдобыстротного распределения** в семействе, т.к. углы вылета частиц связаны с высотой  $H$  образования семейства. Увеличение высоты приводит просто к

сдвигу распределения по оси  $\eta$ . Расчетное распределение зависит от сорта налетающего ядра. На основе модельных расчетов с использованием генератора QGSJET, были получены аппроксимации псевдобыстротных распределений  $dN/d\eta_{(\text{theor})}=F_t(\eta, E_0, A)$  вторичных частиц для взаимодействий нескольких типов первичного ядра и при различных значениях  $E_0$ . Минимизируя функционал  $\chi^2 = \sum ((F_t(E_0, \eta, A) - F_{\text{exp}}(\eta, H, A)) / F_t(E_0, \eta, A))^2$  по величинам  $E_0$ ,  $H$  и по  $A$ , можно получить оценки указанных параметров. Но мы дополнительно ограничили диапазон полных энергий первичной частицы 8–12 ПэВ и учли, что энергия центральной струи оценивается не ниже  $10^{15}$  эВ, а значит энергия на нуклон также должна быть в районе  $(1-2) \cdot 10^{15}$  эВ. Наилучшее согласие, т.е. минимум  $\chi^2$  приходится на высоты  $H = 200 - 400$  м, тип первичного ядра – группа CNO. При этом энергия первичной частицы  $(1.0 - 1.2) \cdot 10^{16}$  эВ, источник, породивший струю – нуклон.

Третьим способом определения высоты был **метод триангуляции**. Его использование возможно, если взаимодействие, породившее данное семейство, произошло не слишком высоко над эмульсионной камерой, тогда высота оценивается, используя небольшую разницу в координатах пятен и треков, образуемых частицами при прохождении камеры в разных слоях регистрации.

В каждом слое в калориметре имелось по две рентгеновских пленки и по одной пластине ядерной эмульсии. Измерения координат пятен по рентгеновским пленкам производилось с помощью компьютерной программы по отсканированным изображениям (точность 25 мкм). Такая методика впервые была применена для обработки суперсемейства. Измерения координат треков в ядерных эмульсиях проводились на единственном в России высокоточном (1 мкм) и полностью автоматизированном комплексе ПАВИКОМ в ФИАН им. П.Н.Лебедева. Всего было измерено около 800 треков и пятен во всех слоях калориметра, где они имелись. В диссертации описаны различные варианты подходов к триангуляции, различающиеся методом математической обработки данных, и способы оценки ошибки процедуры.

Итоговые результаты таковы: по данным из ядерной эмульсии оцененная высота взаимодействия составила  $H = (57 \pm {}^{280}_{35})$  м, по данным из первого рентгеновского слоя пленок высота взаимодействия составила  $H = (51 \pm {}^{340}_{45})$  м.

Т.о. три способа оценки высоты дали различающиеся результаты:  $1180 \pm 340$  м,  $300 \pm 100$  м и  $50 \pm {}^{310}_{40}$  м (округленно). Следует сразу заметить, что во всех случаях эти значения

высоты не слишком велики. Противоречия между оценками могут объясняться тем, что, если реальная высота события мала, оцененные поперечные импульсы частиц будут гораздо больше стандартных представлений. В этом случае оценки по модельным семействам с обычными  $p_t$  должны давать высоты, завышающие истинную. Таким образом, высота взаимодействия может составить и заметно менее 1180 м. Второе и третье значение могут быть согласованы в пределах ошибок, которые особо велики для метода триангуляции, что, в частности, может быть связано с дисторсией пленок и эмульсий, претерпевших длительное хранение. Специально проведенное исследование дисторсии ядерных эмульсий, описанное в диссертации, показало, что локальные флуктуации в дисторсии могут существенно увеличить ошибки в столь тонкой процедуре, как триангуляция.

Зная высоту взаимодействия  $H$ , можно оценить поперечные импульсы вторичных частиц, родившихся в этом взаимодействии, используя формулу  $p_t \cdot H = E \cdot R$ . Здесь  $E$  — энергия вторичной частицы,  $R$  — расстояние от неё до оси семейства. Средние значения  $p_t$  (оцененные по всем 30-ти адронам семейства) для высот взаимодействия  $50 \pm {}^{310}_{40}$  м,  $300 \pm 100$  м и  $1180 \pm 340$  м составляют  $60 \pm {}^{250}_{52}$  ГэВ/с,  $10 \pm {}^5_{2.5}$  ГэВ/с и  $2.5 \pm {}^{1.1}_{0.7}$  ГэВ/с. Таким образом, можно говорить, что значение среднего поперечного импульса в суперсемействе «СТРАНА» превышает 2.5 ГэВ/с, а согласно оценке высоты взаимодействия  $\approx 300$  м, представляющейся наиболее вероятной согласно приведенному выше анализу, может составлять около 10 ГэВ/с. Величины такого порядка рассматривались для возможного теоретического объяснения эффекта выстроенности в [35, 36].

В конце пятой главы приведен краткий обзор возможных теоретических объяснения феномена выстроенности. Рассмотрены привлекательная гипотеза разрыва кварк-глюонной струны при полужесткой неупругой дифракционной диссоциации [35, 38] и ее модификация [39], наиболее изученный механизм рождения полужестких струй [13, 14, 17, 37], возможности механизма вращающегося объекта.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертации.

## Заключение

### Основные результаты и выводы:

**1.** Разработаны методические подходы к анализу появившегося нового класса событий — высокоэнергичных суперсемейств частиц КЛ, зарегистрированных в различных высокогорных и стратосферных эмульсионных экспериментах. Проведен анализ семейств из глубоких свинцовых РЭК эксперимента «Памир», семейств из углеродных памирских камер, семейств Японо-Бразильской коллаборации, данных стратосферного российско-японского эксперимента RUNJOB, данных уникального стратосферного гамма-адронного суперсемейства «СТРАНА».

**2.** Создан набор специальных алгоритмов и программ для проведения анализа суперсемейств космических лучей, регистрируемых эмульсионными камерами. Проведены расчеты, учитывающие специфические особенности объекта исследования. При этом:

а) На основе разработанных автором оригинальных алгоритмов создана программа, моделирующая регистрацию гало в камере, и проведены аналитические расчеты продольного и пространственного развития образующих гало ЭФК в атмосфере и в глубокой камере.

б) Решена задача о перекрытии большого количества ЭФК, регистрируемых на пленке в РЭК. Разработанная автором методика учета перекрытия использована в работе сотрудничества "Памир".

в) Проведены расчеты для оценки доли фоновой случайной выстроенности в предположении известных моделей взаимодействия (MSF и QGSJET). Впервые получены расчетные данные по зависимости фоновой случайной выстроенности от типа первичной частицы.

**3.** Исследована природа образования гало в суперсемействах, сделаны следующие выводы:

а) Впервые показано, что наиболее вероятным и эффективным каналом формирования гало суперсемейств являются электромагнитные процессы: каскады от высокоэнергичных гамма-квантов, возникших в ядерном акте консервативного скейлингового типа на соответствующей высоте над установкой.

б) Наблюдаемые в экспериментах с глубокими РЭК адронные гало являются результатом развития каскадов от отдельных адронов в толщине камеры.

в) На основе анализа данных по продольному и поперечному развитию гало в глубокой камере сделан вывод о необходимости увеличения доли мягких процессов в акте ядерного взаимодействия по сравнению с чисто скейлинговыми моделями и одновременно о сохранении жесткой составляющей скейлингового спектра. Такие квазискейлинговые спектры рождения не противоречат моделям кварк-глюонных струн.

г) Проведена оценка энергии и высоты образования над установкой частицы, ответственной за образование гало и связанной с точкой основного взаимодействия, на основе развитого автором метода анализа продольного и поперечного развития гало в глубокой многослойной камере. Для памирских семейств получен эффективный диапазон высот зарождения частиц, ответственных за гало,  $\tau_{\text{возд.}} = 4 \pm 3$  к.е. (или  $2 \pm 1.5$  км для Памира) над установкой при энергиях этих частиц в диапазоне 200 – 2500 ТэВ.

**4.** На разнообразном экспериментальном материале доказано существование и проведен разносторонний анализ нового физического явления — компланарного разлета вторичных частиц при энергиях  $> 10^{16}$  эВ. Предложенный новый подход к изучению явления выстроенности в семействах — анализ энергетически выделенных центров — позволил увеличить на порядок статистику привлекаемых экспериментальных событий, надежно установить существование самого явления, наличие энергетического порога (около  $10^{16}$  эВ) и ход энергетической зависимости этого явления.

Получены также следующие существенные результаты:

а) Впервые проведенные расчеты фоновой (случайной) выстроенности и варьирование критериев отбора выстроенных событий позволили надежно установить существование самого явления и оптимальные способы его анализа.

б) Использование экспериментальных данных из глубоких свинцовых камер позволило установить, что эффект выстроенности ЭВЦ наилучшим образом среди всех интегральных характеристик семейств коррелирует с числом адронов в семействе  $N_h$  (эффект растет с ростом  $N_h$ ).

в) Анализ взаимодействий при ускорительных энергиях (250 ГэВ) и выстроенности в одиночных взаимодействиях в стратосферном эксперименте RUNJOB (диапазон  $10^{12} - 10^{14}$  эВ) показал отсутствие эффекта выстроенности, еще раз подтвердив пороговый по энергии характер наблюдаемого

эффекта и правильность определения уровня фоновой выстроенности в расчетах, проведенных по модельным семействам.

г) Установлено наличие не искаженного атмосферой эффекта компланарного разлета наиболее энергичных частиц в “чистом” взаимодействии частицы ПКЛ с энергией  $E_0 > 10^{16}$  эВ (уникальное стратосферное гамма-адронное суперсеме́йство «СТРАНА»).

д) В суперсеме́йстве «СТРАНА» был определен тип первичной частицы, отнесенной к группе CNO.

**5.** Впервые экспериментально установлена связь феномена выстроенности с большими значениями поперечных импульсов в соответствующих актах ядерных взаимодействий:

Установлено, что при  $E_0 > 10^{16}$  эВ в стратосферном суперсеме́йстве «СТРАНА» наблюдается и эффект компланарного разлета, и большие поперечные импульсы  $p_t$  частиц семейства. Значение среднего  $p_t$  в таком взаимодействии превышает 2.5 ГэВ/с (наиболее вероятной представляется оценка  $\approx 10$  ГэВ/с).

Корреляция между выстроенностью и большими  $p_t$  подтверждается и данными горных эмульсионных экспериментов, где в широком диапазоне  $E_0 \approx 3 - 200$  ПэВ исследована зависимость от энергии события пространственных характеристик гамма-адронных семейств.

**Основные результаты диссертации опубликованы в  
следующих работах:**

1. Ракобольская И.В., Копенкин В.В., Манагадзе А.К., Михайлова И., Мурзина Е.А., Роганова Т.М., Строгова О., Свешникова Л.Г. Особенности взаимодействий адронов космических лучей сверхвысоких энергий. // Москва, Издательство МГУ. 2000. 256 стр.
2. Манагадзе А.К., Михайлова И.А., Ракобольская И.В. Развитие гало в рентгеноэмульсионной камере. // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 1985. Т. 26. № 4. С. 36–39.
3. Сотрудничество «Памир». О выстроенности энергетически выделенных центров в гамма-адронных семействах. // Известия АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55. № 4. С. 650–653.
4. Сотрудничество «Памир». Развитие гало в глубокой свинцовой рентгенэмульсионной камере. // Известия АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55. № 4. С. 658–661.
5. Иваненко И.П., Копенкин В.В., Манагадзе А.К., Ракобольская И.В. Выстроенность в гамма-адронных семействах космических лучей и характеристики взаимодействий при  $E_0 \approx 10^{16}$  эВ. // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 56. № 4. С. 192–196.
6. Копенкин В.В., Манагадзе А.К., Ракобольская И.В., Роганова Т.М. Выстроенность энергетически выделенных потоков в гамма-адронных семействах и роль адронной компоненты в этом явлении. // Известия РАН. Сер. физ. 1994. Т. 58. №12. С. 13–16.
7. Kopenkin V.V., Managadze A.K., Rakobolskaya I.V., Roganova T.M. Alignment in gamma-hadron families in cosmic rays. // Phys. Rev. D. 1995. V. 52. № 5. P. 2766–2774.
8. Копенкин В.В., Манагадзе А.К. Поведение пространственных характеристик гамма-адронных семейств частиц космических лучей при  $E_0 \approx 10^{15} - 10^{17}$  эВ. // Ядерная физика. 1998. Т. 61. № 12. С. 2227–2230.
9. Манагадзе А.К., Оседло В.И., Галкин В.И., Гончарова Л.А., Копенкин В.В., Котельников К.А., Полухина Н.Г., Ракобольская И.В., Роганова Т.М., Свешникова Л.Г. Компланарный разлет частиц в ядерном взаимодействии при  $E_0 > 10^{16}$  эВ, зарегистрированном в стратосфере. // Письма в ЭЧАЯ. 2002. № 3 [112]. С. 19–24.
10. Галкин В.И., Гончарова Л.А., Копенкин В.В., Котельников К.А., Манагадзе А.К., Оседло В.И., Полухина Н.Г., Ракобольская И.В., Роганова Т.М., Свешникова Л.Г. Характеристики стратосферного суперсемейства "СТРАНА" с  $E_0 > 10^{16}$  ТэВ. // Известия РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. №11. С. 1544–1546.

11. Галкин В.И., Манагадзе А.К., Оседло В.И., Роганова Т.М., Шозиёев Г. Изучение азимутальной анизотропии в ядерных взаимодействиях частиц космических лучей. // Вестник Московского Университета, Сер. 3. Физика. Астрономия. 2003. № 6. С. 34–37.
12. Галкин В.И., Манагадзе А.К. Оценка высоты генерации семейства частиц космических лучей по распаду  $\pi^0$ -мезонов. // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2004. № 3. С. 33–36.
13. Lokhtin I.P., Managadze A.K., Sarycheva L.I., Snigirev A.M. Jet activity versus alignment. // Euro Phys. Journal C44. 2005. № 1. P. 51–57.
14. Lokhtin I.P., Managadze A.K., Sarycheva L.I., Snigirev A.M. Investigation of Alignment in Jet Events. // Physics of Atomic Nuclei. 2006. V. 69. № 1. P. 113–119.
15. Managadze A.K., Osedlo V.I., Roganova T.M., Sveshnikova L.G., Galkin V.I., Rakobolskaya I.V., Goncharova L.A., Kotelnikov K.A., Polukhina N.G. Large transverse momenta in nuclear interaction at  $E_0 > 10^{16}$  eV detected in stratosphere. // Physics of Atomic Nuclei. 2007. V. 70. № 1. P. 184–190.
16. Манагадзе А.К., Оседло В.И., Галкин В.И., Гончарова Л.А., Котельников К.А., Полухина Н.Г., Ракобольская И.В., Роганова Т.М., Свешникова Л.Г. Большие поперечные импульсы в стратосферном суперсемействе «СТРАНА». // Известия РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 4. С. 530–532.
17. Armesto N., Borghini N., Jeon S., ... Managadze A.K. et al. Heavy Ion Collisions at the LHC - Last Call for Predictions. // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 2008. V. 35. № 5. 054001 (170 pp).
18. Манагадзе А.К., Оседло В.И. Два стратосферных суперсемейства с  $E_0 \approx 10^{16}$  эВ. // Известия РАН. Сер. Физ. 2009. Т. 73. № 5. С. 653–655.

### **Список цитируемой литературы:**

19. Krysz A., Tomaszewsky A., Wrotniak J.A. // Acta Universitatis Lodziensis. ZNUL. 1980. Ser. II. V. 32. P. 5–44.
20. Baradzei L.T., Smorodin Yu.A., Asatiani T.L., Genina L.E., Zaratsyan S.V. // Proc. of Intern. Symposium on CR and Particle Physics. Univ. of Tokyo. 1984. P. 136–141.
21. Fedorova G.F., Mukhamedshin R.A. // Bulletin de la Societe des sciences et des lettres de Lodz. Ser. Recherches sur les deformations, Lodz. 1994. V. XVI. P. 137–152.
22. Borisov A.S. et al. // Proc. of International Symposium on Cosmic Ray and Particle Physics. Tokyo. 1984. P. 229.
23. Muhamedshin R.A. // Proc. of 24<sup>th</sup> ICRC, Rome. 1995. V. 1. P. 247–250.
24. Borisov A.S., Guseva Z.M., Denisova V.G. et al. // Proc. of VIII<sup>th</sup> International Symposium on Very High Energy CR Interactions. Tokyo, 1994. P. 49–56.



25. Сотрудничество "Памир". // Известия АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 50. № 11. С. 2125–2128.
26. Xue L., Dai Z.Q., Li J.Y. et al. // Proc. of 26<sup>th</sup> ICRC. Utah, 1999. HE 1.2.24.
27. Capdevielle J.N. // Proc. of 25 ICRC. Durban. 1997. V. 6. P. 57–60.
28. Derbina V.A., Galkin V.I., Hareyama M. et al. (RUNJOB Collaboration). // Astrophys. J. 2005. 628:L41–L44.
29. Калмыков Н.Н., Остапченко С.С. // Ядерная физика. 1993. Т. 56. Вып. 3. С. 105–119.
30. UA5 Collaboration (Aler G.L. et al.) // Nuclear Physics B291. 1987. P. 445.
31. Tamada M. // Journal of Physics G. Nucl. Part. Phys. 1994. V. 20. P. 487.
32. Kawasumi N., Tsushima I., Honda K. et al. // Il Nuovo Cimento. 1996. V. 19C. № 6. P. 1023.
33. Апанасенко А.В., et al. // Proc. of 15<sup>th</sup> ICRC. Plovdiv. 1977. V. 7. P. 220–223.
34. Апанасенко А.В., Горячих А.А., Гончарова Л.А. и др. // Известия АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 55. № 11. С. 2156–2158.
35. Royzen I.I. // Mod. Phys. Lett. A. 1994. V. 9. № 38. P. 3517–3522.
36. Mukhamedshin R.A. // J. High Energy Phys. – 05 – 2005 – 049.
37. Halzen F. and Morris D.A. // Phys. Rev. D. 1990. V. 42. № 5. P. 1435–1438.
38. Миронов А.Д., Ройзен И.И. // Ядерная физика. 1988. Т. 48. № 1(7). С. 194.
39. Wibig T. Alignment in hadronic interaction. // hep-ph/0003230.

**МАНАГАДЗЕ Александр Константинович**

**ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано в печать 07.06.2010

Тираж 100 экз. Заказ № Т-109.

Отпечатано в типографии КДУ  
Тел/факс: (495) 939-44-91, 939-57-32. [www.kdu.ru](http://www.kdu.ru)