

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ГКАЭ СССР

На правах рукописи

ГУЛОВ
Юрий Ахмедович

УДК 539.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЕМЕЙСТВ
ГАММА-КВАНТОВ С ЭНЕРГИЕЙ $\Sigma E_\gamma > 500$ ТэВ В ЯДЕРНО-
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КАСКАДНОМ ПРОЦЕССЕ

(01.04.16: Физика атомного ядра и элементарных частиц)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ЕРЕВАН — 1983 г.

Работа выполнена в физико-техническом институте им. С. У. Умарова АН Тадж. ССР

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор И. П. Иваненко;

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Ф. Нормуратов.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Э. А. Мамиджания;
кандидат физико-математических наук, доцент МГУ Л. Г. Деденко.

Ведущая организация — Московский инженерно-физический институт.

Защита состоится «22» ноября 1983 года в 14-00 часов на заседании Специализированного совета (Д 034.03.01) в Ереванском физическом институте ГКАЭ СССР (г. Ереван-36, ул. Маркаряна 2, 375036).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ
Автореферат разослан «21» октября 1983 года.

Ученый секретарь Специализированного совета кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

В. А. Шахбазян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В ближайшее время эффективная область энергий в исследованиях адрон-ядерных взаимодействий в космических лучах должна стать выше 10^{16} эВ, чтобы достаточно далеко отойти от диапазона $10^{14} \div 10^{15}$ эВ, охватываемого ускорителями нового поколения. Сведения о свойствах адрон-ядерных взаимодействий при энергиях $\gtrsim 10^{16}$ эВ можно получать, изучая характеристики ядерно-электромагнитных каскадов (ЯЭК) инициированных частицами первичного космического излучения: широких атмосферных ливней (ШАЛ) в экспериментах с низким энергетическим порогом регистрации частиц или гамма-адронных семейств с энергией $\gtrsim 10^{15}$ эВ, регистрируемых в экспериментах с использованием на горных высотах $\sim 4000-5000$ м рентгеномульсионных камер (РЭК) — эксперимент "Памир" в СССР с энергетическим порогом $E_{ny} \gtrsim 10^{12}$ эВ. В экспериментах с РЭК, также как отчасти и в ШАЛ, физическую интерпретацию данных затрудняет неопределенность сведений о химсоставе первичного космического излучения в области сверхвысоких энергий. При энергиях $\sim 10^{15}$ эВ в космических лучах получены указания на степенной рост множественности рождающихся в адронных взаимодействиях частиц с увеличением энергии, рост сечений процессов с большими поперечными импульсами частиц, рост сечения неупругого взаимодействия адронов. Можно предполагать, что при переходе к более высоким энергиям эти процессы обнаружат себя более ярко в различных характеристиках регистрируемых событий, в частности, в гамма-адронных семействах. Так при энергиях гамма-семейств $\Sigma E_{\gamma} > 5 \cdot 10^{14}$ эВ ($E_{ny} \gtrsim 2 \cdot 10^{12}$ эВ) наблюдают две разновидности событий, содержащих область повышенного фона — гало и без гало. Наличие или отсутствие гало может быть связано с особенностями развития ЯЭК в атмосфере или химического состава первичных космических лучей. Возможная физическая интерпретация экспериментального материала обычно следует из анализа модельных расчетов ЯЭК и их сопоставления с экспериментом, поэтому проведение детального моделирования ЯЭК в атмосфере по ряду моделей адрон-ядерных взаимодействий при различных предположениях о химсоставе первичных космических лучей,

моделирование развития гамма-семейств в гамма-блоке РЭК для изучения характеристик семейств с гало и без гало и определение некоторых характеристик адрон-ядерных взаимодействий при энергиях $\sim 10^{16}$ эВ, выполненные в диссертационной работе, безусловно актуальны.

Целью настоящей работы являлось:

- изучение механизмов образования двух типов суперсемейств гамма-квантов с энергией $\sum E_{\gamma} \geq 5 \cdot 10^{14}$ эВ ($E_{n\gamma} \geq 2 \cdot 10^{12}$ эВ) на горных высотах на основе модельных расчетов ЯЭК в атмосфере с энергиями первичных частиц $> 5 \cdot 10^{15}$ эВ;
- выявление характеристик гамма-семейств, чувствительных к свойствам адрон-ядерных взаимодействий;
- выявление характеристик гамма-семейств, чувствительных к химсоставу первичного космического излучения;
- изучение характеристик адрон-ядерных взаимодействий при энергиях $\sim 10^{16}$ эВ.

Научная новизна работы. Впервые проведен расчет характеристик суперсемейств гамма-квантов в ЯЭК с порогом

$E_{n\gamma} = 0,5$ ТэВ с использованием широкого класса моделей адрон-ядерных взаимодействий при различных предположениях о химсоставе первичного излучения. Выделены две группы событий - с гало и без гало, для которых получен ряд характеристик. Обнаружена чувствительность характеристик двух типов событий к свойствам модели множественного рождения частиц и химсоставу. Исследованы механизмы образования гало в гамма-семействах. Получены характеристики "реалистической" модели адрон-ядерного взаимодействия при $E \sim 10^{16}$ эВ.

Практическая ценность работы. Изучены вероятные механизмы генерации суперсемейств гамма-квантов с гало и без гало для широкого класса моделей взаимодействий и показана возможность эффективного изучения свойств адрон-ядерных взаимодействий при энергиях $\sim 10^{16}$ эВ на основе анализа данных двух типов суперсемейств гамма-квантов, регистрируемых в экспериментах с РЭК. Получена оценка верхней границы доли ядер железа в составе первичного космического излучения при энергиях $\sim 10^{16}$ эВ. Определены основные черты модели адрон-ядерных взаимодействий с каналами

малой и большой диссипации энергии, позволяющей описать существующий набор экспериментальных данных по суперсемействам гамма-квантов. Указанные результаты могут быть использованы в исследованиях свойств адрон-ядерных взаимодействий в экспериментах с РЭК, а также полезны для построения модели взаимодействий, позволяющей интерпретировать широкую совокупность данных в космических лучах.

Апробация работы. Результаты, приведенные в диссертации, докладывались многократно на совещаниях Сотрудничества "Памир" (1976-1982 гг.), 18-ой Международной конференции по космическим лучам (1983г.), конференциях молодых ученых Тадж. ССР (1977 г.) и БССР (1978 г.), обсуждались на научных семинарах ФТИ АН Тадж.ССР, ОИВМ и ОЧСВЭ НИИЯФ МГУ, лаборатории космических лучей ФИАН СССР.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 7 работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы, содержит 154 страниц текста, включая 34 рисунка, 12 таблиц и библиографию из 89 наименований.

Автор выносит на защиту:

1. Результаты исследования различных механизмов образования гало в гамма-семействах, регистрируемых в РЭК на горных высотах.
2. Результаты модельных расчетов характеристик двух типов суперсемейств гамма-квантов в ЯЭК для случаев разных первичных ядер и однокомпонентных моделей при сверхвысоких энергиях.
3. Оценку верхней границы доли ядер железа в составе первичного космического излучения при энергиях $\sim 10^{16}$ эВ.
4. Некоторые черты реалистической модели адрон-ядерных взаимодействий при энергиях $\sim 10^{16}$ эВ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность изучения адронных взаимодействий в космических лучах при сверхвысоких

энергиях в экспериментах с использованием РЭК, научная новизна и практическая значимость работы; приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе дан обзор экспериментальных и теоретических результатов по процессам множественного рождения частиц в адронных взаимодействиях, результатов экспериментального изучения гамма-семейств, регистрируемых в РЭК на горных высотах, и моделирования их характеристик; обсуждается задача изучения свойств адрон-ядерных взаимодействий при энергиях $\geq 10^{16}$ эВ с использованием характеристик суперсемейств гамма-квантов и формулируется цель исследования.

Во второй главе описана процедура моделирования гамма-семейств в атмосфере. Расчет ЯЭК проведен методом Монте-Карло. Рассмотрены три модели взаимодействия адронов с ядрами вещества атмосферы: с малой диссипацией энергии (МД) скейлингового типа и зависимостью множественности вторичных адронов от энергии $n_h \sim \ln E_0$, умеренной диссипацией энергии (УД), $n_h \sim E_0^{1/4}$ и большой диссипацией энергии (БД), $n_h \sim E_0^{1/2}$. Для взаимодействующего адрона свободный пробег выбирался $\langle \lambda_N \rangle = 75 \text{ г/см}^2$ в моделях МД, БД и $\langle \lambda_N \rangle = 92,8 \text{ г/см}^2 (1+0,016 \ln^{1,5} (12,5 E_0/10^{12} \text{ эВ}))$ в модели УД, $\langle \lambda_N \rangle = (1,4 \div 1,47) \langle \lambda_N \rangle$, коэффициент неупругости взаимодействия $\langle K_N \rangle = 0,5$, $\langle K_T \rangle = 0,6$, поперечный импульс $\langle P_{tN} \rangle = 0,5 \div 0,8 \text{ ГэВ/с}$, $\langle P_{tT} \rangle = 0,33 \div 0,4 \text{ ГэВ/с}$. Характеристики рождающихся во взаимодействии адронов (учитывались только пи-мезоны) воспроизводились при моделировании изотропного распада на пи-мезоны незаряженного фибробола массой $M_\phi \sim E_0^{1/4} \div 1/2$ в моделях УД, БД или последовательности фиброболов конечной массы $M_\phi = 2,6 \text{ ГэВ/с}^2$, $n_\phi \sim \ln E_0$

в модели МД, причем температура распада, характеризующая импульсы пи-мезонов в спектре Планка, $T_K \approx m_\pi$. Принималось, что характеристики вторичных частиц не зависят от квантовых чисел исходных адронов. Зависимости средней множественности рожденных пи-мезонов в переднем конусе от энергии взаимодействующего адрона E_0 принимали следующий вид:

$$\text{МД: } \langle n_T \rangle = 1,55 \ln (E_0/10^{12} \text{ эВ}) + 6,58$$

$$\text{УД: } \langle n_T \rangle = 7,0 (E_0/10^{12} \text{ эВ})^{1/4}$$

$$\text{БД: } \langle n_T \rangle = 8,0 (E_0/10^{12} \text{ эВ})^{1/2}$$

В расчетах по модели МД в первичном космическом излучении рассматривались только протоны и ядра железа, УД - протоны и α -частицы, БД - только протоны, причем спектр первичных частиц предполагался в виде $N_A (> E_0) \sim E_0^{-2,1}$. Средние свободные пробеги ядер $\langle \lambda_{Fe} \rangle = 15 \text{ г/см}^2$, $\langle \lambda_H \rangle = 1/2$. Принималось, что ядро железа при взаимодействии полностью фрагментирует на не взаимодействующие нуклоны, а нуклоны α -частицы с вероятностью 1/2 взаимодействуют обычным образом. В расчете ЯЭК моделировалось трехмерное развитие электронно-фотонных каскадов (ЭЭК), инициированных гамма-квантами, образованными при распадах нейтральных пи-мезонов. При моделировании характеристик рождающихся во взаимодействии частиц переднего конуса энергетический порог не вводился. В процессе развития ЭЭК учитывались адроны с энергией выше 2 ТэВ и гамма-кванты, электроны, позитроны (ниже под общим названием "гамма-кванты") с энергией выше 0,5 ТэВ. Расчет ЯЭК проведен для вертикального направления в неоднородной атмосфере с использованием аппроксимационной зависимости давления - Р от высоты - Н в стандартной атмосфере $P = 1160,3 \exp(-H/6600 \text{ м}) \text{ г/см}^2$. Регистрация гамма-семейств и их адронного сопровождения осуществлялась на высоте 4370 м, $P = 596 \text{ г/см}^2$ (Эксперимент "Памир"). Смоделированные гамма-семейства обрабатывались с учетом пространственного разрешения рентгеновской пленки, погрешности измерения энергии ($\Delta E_\gamma = 0,25 E_\gamma$), энергетического порога $E_{th} = 2 \text{ ТэВ}$. В семейства включались частицы, расположенные на расстоянии $R_\gamma \leq 15 \text{ см}$ до энергетически взвешенного центра, требовалось $n_\gamma \geq 3$. Характеристики гамма-семейств с $\Sigma E_\gamma \geq 100 \text{ ТэВ}$, $E_\gamma \geq 2 \text{ ТэВ}$ на статистике 91 гамма-семейство в модели Р:МД хорошо согласуются с результатами других работ.

В третьей главе изложен метод расчета области повышенного фона в гамма-семействах-гадо. На глубинах регистрации $\lesssim 10 \text{ к.е.}$ свинцовой РЭК рассчитывались значения плотности электронов N_e от электромагнитных ливней, образованных гамма-квантами, электронами (позитронами) семейства. В плоскости регистрации строилась сетка размером $20 \times 20 \text{ мм}^2$ с шагом 0,5 мм, причем ее центр совпадал с

энергетическим взвешенным центром события. В узлах сетки в круге радиусом 48 мкм рассчитывались значения средней плотности электронов или степени потемнения рентгеновской пленки. На расстояниях ≤ 300 мкм от частицы до соответствующей точки плотность электронов в ливне вычислялась с помощью выражений осевого приближения трехмерной теории электромагнитных ливней, на расстояниях ≥ 300 мкм использовалось приближение больших радиусов ($E_0 = \infty$). Полное число электронов в ливне на глубинах ≤ 10 к.е. рассчитывалось в приближении Б каскадной теории для легкого вещества. Для исходных гамма-квантов семейства проводился розыгрыш конверсионных пробегов до образования первой электрон-позитронной пары. При энергиях выше 10 ТэВ уменьшением сечения с ростом энергии приближенно учитывался эффект Ландау-Померанчука-Митдала. Затем рассчитывались средние характеристики ливней, инициированных исходными электронами (позитронами) гамма-семейства и электрон-позитронными парами, образованными гамма-квантами.

Рассмотрено образование гало в пространственно-энергетических конфигурациях частиц гамма-семейства, обусловленных процессом развития в атмосфере электронно-фотонного каскада высокой энергии или адронным взаимодействием с большой диссипацией энергии ($N_0 \sim E_0^{1/2}$, $E_0 \approx 10^4$ ТэВ) на низкой высоте над установкой $H \leq 1+2$ к.е. Функция распределения плотности потемнения в центральной части гало различна для этих механизмов образования гало. Рассмотрен вклад в гало частиц гамма-семейства различной энергии ($E_0 \geq 0,1$ ТэВ), что дало основание в дальнейших расчетах учитывать только вклад частиц с $E_0 \geq 0,5$ ТэВ.

В четвертой главе представлены результаты расчета суперсемейств гамма-квантов с $\Sigma E_0 \geq 500$ ТэВ, $E_0 \geq 2$ ТэВ и проведен сравнение с данными эксперимента "Памир". Статистика событий показана в табл. I, где E_0^{min} обозначает минимальную энергию в спектре первичных частиц, причем в случае модели Р:ЕД розыгрыш ЯЭК проводился при дискретных значениях E_0 .

Таблица I

Объем расчета

Модель	Р:МД	E_0 :МД	Р:УД	α :УД	Р:ЕД
E_0^{min} (РэВ)	2	20	6,3	10	40
$N_{ЯЭК}$	1310	270	586	224	113
N_{CC} (≥ 500 ТэВ)	91	59	41	15	30

Указанные значения E_0^{min} обеспечивают точность оценки интенсивности суперсемейств на уровне статистической. Помимо суперсемейств на магнитной ленте записывались гамма-семейства с $\Sigma E_0 \geq 400$ ТэВ, $E_0 \geq 0,5$ ТэВ. Статистика смоделированных суперсемейств превышает (в случае некоторых моделей) или близка к имеющейся экспериментальной $N_{CC} \sim 50$.

Интенсивности суперсемейств гамма-квантов.

В табл. 2 приведены медианные значения энергии первичных ядер - $E_0^{(1/2)}$, вклад от частиц с энергией выше (и ниже) которой составляет 50 % интенсивности суперсемейств.

Эта величина характеризует диапазон изучаемых энергий и во всех моделях $\geq 10^{16}$ эВ. Приведены также нормированные к интенсивностям первичных частиц при $E_0 \geq 10^{16}$ эВ интенсивности суперсемейств, которые сопоставляются с данными эксперимента "Памир" в случае нормального химического состава первичного космического излучения: I ($\geq 10^{16}$ эВ) = $0,66 \text{ м}^{-2} \text{ г}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, 40% - Р; 15% - α ; 20% - β .

Таблица 2

Интенсивность суперсемейств гамма-квантов

Модель	P:МД	Fe:МД	P:УД	Δ:УД	P:БД	Эксперимент ²⁾
E_0 (I/2) (РэВ)	8	49	19	45	54	
$I_{\text{ср}}$	2,6	0,07	0,17	0,07	0,02	
I ($\geq 10^{16}$ эВ)	$\pm 0,2$	$\pm 0,01$	$\pm 0,025$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	
$I_{\text{ср}}$ ($m^{-2} \text{г}^{-1} \text{ор}^{-1}$)	0,5	0,009	0,04	0,007	0,006	0,05
химсостав ¹⁾	$\pm 0,05$	$\pm 0,0015$	$\pm 0,006$	$\pm 0,002$	$\pm 0,0025$	$\pm 0,01$

1) Никольский и др., 1979;

2) Сотрудничество "Памир", 1982 г.

К экспериментальному результату близка в случае нормального химсостава интенсивность суперсемейств в модели (P + Δ):УД, причем вклад ядер с Δ > 1 составляет менее 30 %. Интенсивность суперсемейств в модели P:МД существенно выше экспериментальной, однако значительно уменьшив интенсивность протонов и соответственно увеличив долю ядер железа можно достичь удовлетворительного согласия с экспериментом и для модели с малой диссипацией энергии. Экспериментальный результат может быть также грубо описан моделью P:БД, если первичное космическое излучение полностью состоит из протонов.

В эксперименте с суперсемействами гамма-квантов появляется дополнительная возможность рассматривать интенсивности и характеристики событий двух типов: в одних наблюдается протяженная область повышенного фона (гало) радиусом ~ 1,5 + 16 км - в других ее практически нет. Образование гало связано с концентрацией энергии гамма-компоненты события на сравнительно небольшом участке и, следовательно, с соответствующими процессами в ЯЭК, приводящими к концентрации энергии: ЭК высокой энергии в атмосфере или ядерное взаимодействие с большой диссипацией энергии на низкой высоте над установкой. Рассматриваемые модели ЯЭК позволяют оценить роль этих механизмов, в частности, в модели МД более половины энергии,

идущей в гамма-кванты в одном взаимодействии, передается двум гамма-квантам, а в модели БД механизмы образования гало посредством ЭК высокой энергии полностью подавлены.

Во всех смоделированных семействах гамма-квантов был проведен расчет гало на глубине РЭК 9 к.е. с учетом гамма-квантов с $E_{\gamma} \geq 0,5$ ТэВ. Выделены две группы событий: с гало (Г-семейства) по критерию $\eta_e \geq 0,032$ эл/мм² на площади ≥ 5 мм² хотя бы для одного центра и суперсемейства гамма-квантов без гало (БГ-семейства) с $\sum E_{\gamma} \geq 500$ ТэВ, $E_{\gamma} \geq 2$ ТэВ. Только в модели P:МД в группу событий с гало вошло несколько семейств с $\sum E_{\gamma} < 500$ ТэВ (10 %). В табл. 3 приведены значения интенсивностей Г-семейств и БГ-семейств и их отношения. Здесь же представлены значения интенсивностей семейств двух типов, полученные в эксперименте "Памир" при отборе по вышеуказанным критериям.

Таблица 3

Интенсивности суперсемейств гамма-квантов с гало и без гало

Модель	P:МД	Fe:МД	P:УД	Δ:УД	P:БД	эксп ¹⁾ $I_{\gamma}/0,3$
I_{Γ}	1,45	0,011	0,043	0,018	0,0025	0,083
I ($\geq 10^{16}$ эВ)	$\pm 0,18$	$\pm 0,0035$	$\pm 0,014$	$\pm 0,01$	$\pm 0,001$	$\pm 0,02$
$I_{\text{БГ}}$	0,75	0,064	0,127	0,052	0,0175	0,083
I ($\geq 10^{16}$ эВ)	$\pm 0,13$	$\pm 0,0075$	$\pm 0,023$	$\pm 0,016$	$\pm 0,008$	$\pm 0,02$
I_{Γ}	2,0	0,17	0,35	0,35	0,15	1,0
$I_{\text{БГ}}$	$\pm 0,25$	$\pm 0,06$	$\pm 0,12$	$\pm 0,22$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$

1) Сотрудничество "Памир", 1982 г.

Модель P:БД позволяет получить минимальную оценку интенсивности Г-семейств, которые практически полностью формируются продуктами одного взаимодействия на низкой высоте над установкой (40 + 400 м). Также как и в P:БД в модели (P + Δ):УД обнаруживается недостаток Г-семейств - отно-

шение $I_{\Gamma}^{UD} / I_{\Gamma}^{UD} = 0,35$, что гораздо меньше экспериментально наблюдаемого значения $I_{\Gamma}^{\beta} / I_{\Gamma}^{\beta} \approx 1,0 \pm 0,2$.

Примерно в 30 % случаев гало в (P + α):УД связаны с взаимодействиями на небольших высотах, в остальных - с развитием высокоэнергичных ЭФК. Преобладание БГ-семейств и недостаток Г-семейств в моделях взаимодействия, подобных УД или БД, связаны с подавлением электромагнитного канала генерации гало. В модели P:МД, напротив, наблюдается существенное превышение интенсивности Г-семейств над интенсивностью БГ-семейств, что обусловлено большими вероятностями образования высокоэнергичных гамма-квантов во взаимодействиях. 30 % событий с гало имеют многоцентровую структуру, возникающую от сложения вкладов нескольких воздушных ЭФК, образованных во взаимодействиях на разных высота. На рис. 1 приведены примеры характерных гало в семействах с $\Sigma E_{\gamma} \approx 2000$ ТэВ, полученных по моделям: P:МД, P:УД и P:БД. Различия в форме гало связаны с соответствующими различиями характеристик ядерного и электромагнитного каналов генерации гало. Из сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными следует, что в ~ 90 % случаев гало должно иметь электромагнитное происхождение и что модели УД, БД не могут обеспечить наблюдаемого значения интенсивности Г-семейств. Преобладание Г-семейств $I_{\Gamma}^{P:МД} / I_{\Gamma}^{P:МД} = 2,0$ и значительное завышение интенсивности в модели P:МД взаимосвязаны, так как то и другое определяются процессом диссипации энергии в ЯЭК. Для того, чтобы снизить интенсивность событий в модели МД необходимо предположить большую долю тяжелых ядер в первичном космическом излучении при энергиях $> 10^{15}$ эВ. Это одновременно приводит к уменьшению соотношения $I_{\Gamma}^{МД} / I_{\Gamma}^{МД} \approx 1,0$, так как в событиях модели F_2 :МД преобладают БГ-семейства - $I_{\Gamma}^{F_2:МД} / I_{\Gamma}^{F_2:МД} = 0,17$. В рамках рассматриваемой модели МД с независимыми от энергии сечением и коэффициентом неупругости взаимодействия следует, что удовлетворительное описание интенсивностей Г и БГ-семейств достигается при предположении в первичном космическом излучении доли протонов - 5 % и ядер железа - 95 %. В дальнейшем с таким соотношением протонов и ядер железа рассматривается модель (P + F_2):МД. Часть Г-семейств ($\approx 13\%$) в этой модели

генерируется в ЯЭК от ядер железа, причем в половине случаев гало в ЯЭК от ядер железа имеет электромагнитное происхождение - в остальных гало образуется вследствие перекрытия электромагнитной компоненты каскадов, возникающих при взаимодействиях нуклонов первичного ядра железа с начальной энергией $\approx 10^{17}$ эВ, и достигает больших размеров ~ 20 мкм

Таблица 4

Характеристики Г-семейств гамма-квантов ($E_{\gamma} > 2$ ТэВ)

Модель	$\langle \Sigma E_{\gamma} \rangle$ ТэВ	$\langle N_{\gamma} \rangle$	$\langle N_{\beta} \rangle$ $F \approx 0,04$	$\langle R_{\gamma} \rangle$ мм	$\langle R_{\beta} \rangle$ ТэВ мм 2	$\langle R_{\beta} \rangle$ % 0,01
P:МД	1100 ± 100	746 ± 15	9,0 $\pm 0,5$	16,1 $\pm 0,8$	81 ± 4	11,4 $\pm 0,8$
F_2 :МД	5100 ± 1200	672 ± 21	11,1 $\pm 0,4$	33,2 $\pm 1,9$	161 ± 2	16,0 $\pm 2,5$
P:УД	2660 ± 900	331 ± 81	10,1 $\pm 1,1$	23,5 $\pm 2,6$	107 ± 8	13,6 $\pm 2,7$
α : УД	1390 ± 260	209 ± 74	13,0 $\pm 1,4$	23,2 $\pm 2,8$	108 ± 10	11,5 $\pm 4,0$

Пространственные и энергетические характеристики суперсемейств гамма-квантов. В табл. 4,5 приведены средние характеристики Г- и БГ-семейств гамма-квантов, полученные для разных моделей ЯЭК. Результаты расчетов по модели P:БД не приводятся, поскольку их нельзя было усреднить по энергетическому спектру первичных космических лучей.

Характеристики семейств, смоделированных по разным моделям, имеют заметный разброс как в рамках группы событий определенного типа, так и в событиях разного типа.

Таблица 5

Характеристики БГ-семейств гамма-квантов
($\sum E_{\gamma} > 500$ ТэВ, $E_{\gamma} \geq 2$ ТэВ)

Модель	$\langle \sum E_{\gamma} \rangle$	$\langle N_{\gamma} \rangle$	$\langle N_{\gamma}' \rangle$	$\langle R_{\gamma} \rangle$	$\langle ER_{\gamma} \rangle$	$\langle R_{\gamma}' \rangle$
	ТэВ		$f' \geq 0,04$	мм	ТэВ мм	$f' \geq 0,01$
P:МД	670 ± 40	94 ± 7	9,8 $\pm 0,6$	22,9 $\pm 1,0$	116 ± 5	17,7 $\pm 1,1$
Fe:МД	920 ± 70	165 ± 13	11,5 $\pm 0,4$	46,7 $\pm 0,8$	211 ± 4	37,2 $\pm 1,2$
P:УД	676 ± 45	124 ± 9	11,1 $\pm 0,6$	27,7 $\pm 1,3$	125 ± 6	22,9 $\pm 1,5$
λ : УД	1020 ± 210	193 ± 40	12,5 $\pm 0,6$	36,1 $\pm 2,2$	157 ± 10	22,7 $\pm 2,6$

Особенности образования гало отчетливо проявляются при сравнении плотности энергии в Г- и БГ-семействах и $\sum E_{\gamma}$ Г-семейств. В Г-семействах плотности энергии примерно в 5 раз выше, чем в БГ-семействах при той же модели, что и определяет образование гало. Необходимая плотность энергии в Г-семействах модели P:МД достигается при меньших энергиях $\sum E_{\gamma}$ вследствие большой эффективности электронно-фотонного канала образования гало. Отметим значительное различие характеристик семейств, генерируемых первичными протонами и ядрами железа в модели МД: от ядер железа существенно выше энергия Г-семейств, в 2 раза больше пространственный размер Г- и БГ-семейств. С увеличением степени диссипации энергии в ЯЭК энергетические спектры гамма-квантов в семействах становятся все мягче, наиболее жесткий спектр - в семействах в модели P:МД.

Для сравнения с пространственными и энергетическими характеристиками суперсемейств гамма-квантов были использованы экспериментальные данные сотрудничества "Памир" (1977 г.). На рис. 2-5 представлены интегральные распределения по относительной доли энергии гамма-квантов $f' = E_{\gamma} / \sum E_{\gamma}$

($f' \geq 0,04$) и пространственные дифференциальные распределения гамма-квантов с $f' \geq 0,01$, причем распределения по f' нормированы на N_{γ}' ($f' \geq 0,04$), а пространственные - на $N_{\gamma}'(f' \geq 0,01)$. С экспериментальным распределением по f' Г-семейств (рис. 2) из-за больших ошибок в правой части распределения можно согласовать расчеты по разным моделям. Однако пространственные распределения Г-семейств шире экспериментальных (рис. 3). Большое уширение в моделях P:УД и Fe:МД можно объяснить заметным вкладом ядерного канала, дающего по сравнению с электронно-фотонным каналом более широкие гало. Несколько более широкое распределение в модели P:МД объясняется использованием постоянных величин Z_{in}^{eff} и $\langle n_{in} \rangle$. В P:МД эффективный интервал высот, с которых собираются гамма-кванты, несколько больше необходимого для лучшего согласия с экспериментом. Первый максимум распределения в модели P:УД как раз совпадает с положением максимума экспериментального распределения и генерируется ЭЖ, создавшим в семействе довольно слабое гало. Таким образом, гало в семействах порождается ЭЖ, инициированным одним (или двумя-тремя) высокоэнергичными гамма-квантами. В случае БГ-семейств распределения по f' нельзя согласовать с экспериментальным ни по одной модели (рис. 4). Экспериментальное распределение характеризуется большей крутизной или мягкостью. Самые значительные различия с экспериментом обнаруживают модели P:МД и (P+Fe):МД. Увеличивая степень диссипации энергии в модели можно, по-видимому, добиться согласия с экспериментом. Расхождение с экспериментом проявляется и при сравнении пространственных распределений модельных БГ-семейств (рис. 5), причем опять-таки в наибольшей степени для модели (P+Fe):МД. Довольно близким к эксперименту оказывается распределение БГ-семейств модели P:УД. Отметим, что последние данные сотрудничества "Памир" (1982г.) с уточнением процедуры определения больших значений энергий гамма-квантов указывают на сближение спектра по f' Г-семейств с моделью P:МД и соответствующего спектра БГ-семейств с моделью (P+ λ):УД.

Из пространственного распределения БГ-семейств можно получить оценку доли ядер железа в первичном излучении $< 70\%$.

что расходится с соответствующим результатом. $> 90\%$, полученном при описании интенсивностей Г- и БГ-семейств в модели МД. Понижение доли ядер железа в модели $(P + Fe):МД$ увеличивает и без того существенное различие спектра по f' этой модели с экспериментом.

Помимо рассмотренных характеристик гамма-семейств в экспериментах с РЭК существует также возможность изучения характеристик адронного сопровождения семейств, но пока еще адронная компонента высокоэнергичных семейств изучена лишь у единичных событий. Некоторые результаты расчета по адронному сопровождению суперсемейств гамма-квантов обнаруживают дополнительные возможности повышения чувствительности эксперимента к особенностям развития ЯЭК, в частности, энергия адронной компоненты в Г-семействах, инициированных ядрами, в несколько раз больше, чем в семействах от протонов — этот эффект можно изучать, рассматривая развитие гало в адронном блоке РЭК. Представляет интерес и исследование адронного состава семейств, так как для тяжелых ядер выделена нуклонная компонента.

Проведенный совместный анализ данных по Г- и БГ-семействам гамма-квантов с определенностью приводит к выводу, что ни одна из количественно рассмотренных моделей ЯЭК не соответствует действительности. В модели $(P + Fe):МД$, позволяющей правильно описать экспериментальные данные по интенсивностям Г- и БГ-семейств, энергетические и пространственные характеристики БГ-семейств значительно расходятся с экспериментом. Модели же типа УД, БД противоречат данным по Г-семействам. Рассмотренные модели предполагают некоторый однотипный механизм адронных взаимодействий в широком диапазоне энергий: либо малочастичный процесс с постоянным $\Sigma_{in}^{н}$ и $\langle K \rangle$, либо многочастичный процесс с постоянным или растущим $\Sigma_{in}^{н}$. Некоторые модели удовлетворительно описывают отдельные экспериментальные характеристики. В более реальной модели, по-видимому, сечение малочастичных процессов должно падать с энергией (в долях полного сечения), а $\langle K \rangle$ расти, и, соответственно, доля многочастичных, мягких процессов должна расти. Результаты проделанного расчета по определению интенсивности Г-семейств в модели Р:МД обнаруживают 12-кратное занижение интенсивности по сравнению с экспе-

риментальным значением в случае сложного химического состава первичного космического излучения. Следовательно, $\Sigma_{in}^{н} \approx 0,1$ (10^{16} эВ) по модели МД может обеспечить экспериментальное значение интенсивности Г-семейств. Это означает, что фрагментация налетающего нуклона (в частности, процессы дифракционной диссоциации) с величиной сечения, примерно равной его величине при более низких энергиях $\sim 10^{12}$ эВ, может обеспечить согласие расчетных и экспериментальных характеристик суперсемейств гамма-квантов, возникающих от адронов с энергиями $10^{15} + 10^{17}$ эВ. В большей же доле взаимодействий должно проявляться взаимодействие типа умеренной или большой диссипации энергии. На этом пути, как было видно выше, можно, по-видимому, достичь удовлетворительного описания пространственных и энергетических характеристик Г- и БГ-семейств гамма-квантов с $\Sigma E_{\gamma} \geq 500$ ТэВ.

В заключении формулируются основные результаты, полученные в диссертации:

1. Разработана комплексная программа моделирования характеристик гамма-семейств, возникающих в результате развития в атмосфере ЯЭК, с учетом условий регистрации в РЭК.

2. Гало в гамма-семействах обусловлено высокой концентрацией энергии в круге радиусом $\sim 1,5 \pm 20$ км, возникающей в результате различных физических механизмов:

- развития в атмосфере электронно-фотонного каскада, инициированного небольшим числом (одним-тремя) гамма-квантов с энергией порядка нескольких сот ТэВ в диапазоне высот 1-6 км над установкой — электромагнитный канал;

- адрон ядерного взаимодействия с большой диссипацией энергии ($n_h \sim E_0^{1/4+1/2}$, $E_0 = 10^4$ ТэВ) на высотах $\approx 1 \pm 2$ к.е. — ядерный канал;

- развития в атмосфере ЯЭК, инициированного первичным тяжелым ядром (железа) с энергией $\approx 10^{17}$ эВ.

Сопоставление с экспериментальными данными показывает, что электромагнитный канал генерации гало в $\sim 90\%$ случаев обеспечивает возникновение гало.

3. Сопоставление результатов расчетов по моделям с малой ($n_h \sim \ln E_0$), умеренной ($n_h \sim E_0^{1/4}$) и большой ($n_h \sim E_0^{1/2}$) диссипацией энергии показывает:

- к каналу малой диссипации энергии чувствительны интенсивность семейств с гало, пространственное распределение гамма-квантов в этих семействах;

- к каналу умеренной или большой диссипации энергии чувствительны интенсивность суперсемейств без гало, энергетическое и пространственное распределение частиц этих семейств;

- к химсоставу чувствительны интенсивность многоцентровых событий с гало, интенсивность суперсемейств без гало, пространственное распределение частиц семейств без гало.

Сравнение с экспериментальными данными по суперсемействам гамма-квантов показывает, что однокомпонентные модели взаимодействия не позволяют описать имеющуюся совокупность данных.

4. Предположение большой доли ядер железа в первичном космическом излучении при энергиях $\sim 10^{16}$ эВ и выполнения скейлинга в адрон-ядерных взаимодействиях в области энергий $10^{13} + 10^{16}$ эВ не позволяет получить согласованные оценки относительной интенсивности ядер железа: $0,9 < I_{Fe}(> 10^{16} \text{ эВ}) / I(> 10^{16} \text{ эВ}) < 0,98$ - по соотношению суперсемейств гамма-квантов с гало и без гало и $I_{Fe} / I < 0,7$ - по пространственному распределению частиц семейств без гало; не позволяет удовлетворительно описать энергетические спектры частиц в семействах без гало и, таким образом, противоречит экспериментальным данным по двум типам суперсемейств гамма-квантов.

5. Сопоставление результатов расчетов с экспериментом по характеристикам гамма-семейств с гало свидетельствует о необходимости сохранения скейлингового канала адрон-ядерного взаимодействия при энергиях $\approx 10^{16}$ эВ с сечением $\approx 0,13 \ln(10^{16} \text{ эВ}) \sim (0,2 + 0,3) \ln(10^{12} \text{ эВ})$ и росте сечения в 1,5 + 2 раза в интервале энергий $10^{13} + 10^{17}$ эВ за счет процессов с большой диссипацией энергии.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гулов Ю.А., Нормуратов Ф. Эффект "гало" в суперсемействах γ -квантов. Доклады АН Тадж.ССР, 1978, № 6, с.16-18.
2. Гулов Ю.А., Нормуратов Ф. Причины появления "гало". Доклады АН Тадж.ССР, 1978, № 8, с.17-20.
3. Гулов Ю.А., Нормуратов Ф. Эффект гало в ядерно-каокадном процессе. Доклады АН Тадж.ССР, 1982, № 12, с.724-727.
4. Гулов Ю.А., Нормуратов Ф. Скейлинг, семейства γ -квантов. Известия АН Тадж.ССР, физ-мат., хим. и геол. наук, 1983, № 1, с.29-37.
5. Gulov Ju.A., Ivanenko I.P., Normuratov F. Characteristics of the gamma-ray families with energy over 500 Tev. - M., 1983. - 48 p. (preprint/FIAN: № 143)
6. Gulov Ju.A., Normuratov F. Calculation of characteristics of gamma-families with $\Sigma E_{\gamma} > 500 \text{ Tev}$. 1. Characteristics of interaction models, testing according to results of calculations of gamma-families with halo with $\Sigma E_{\gamma} > 500 \text{ Tev}$, $E_{\gamma} > 2 \text{ Tev}$. - Proc. of 18-th ICRC, Bangalore, 1983, № 5, p.270-273.
7. Gulov Ju.A., Ivanenko I.P., Normuratov F. Calculation of characteristics of gamma-ray non families without halo, Realistic model of hadron interaction at energies $10^{13} - 10^{16} \text{ eV}$. - Proc. of 18-th ICRC, Bangalore, 1983, № 5, p.274-278.

Гулов

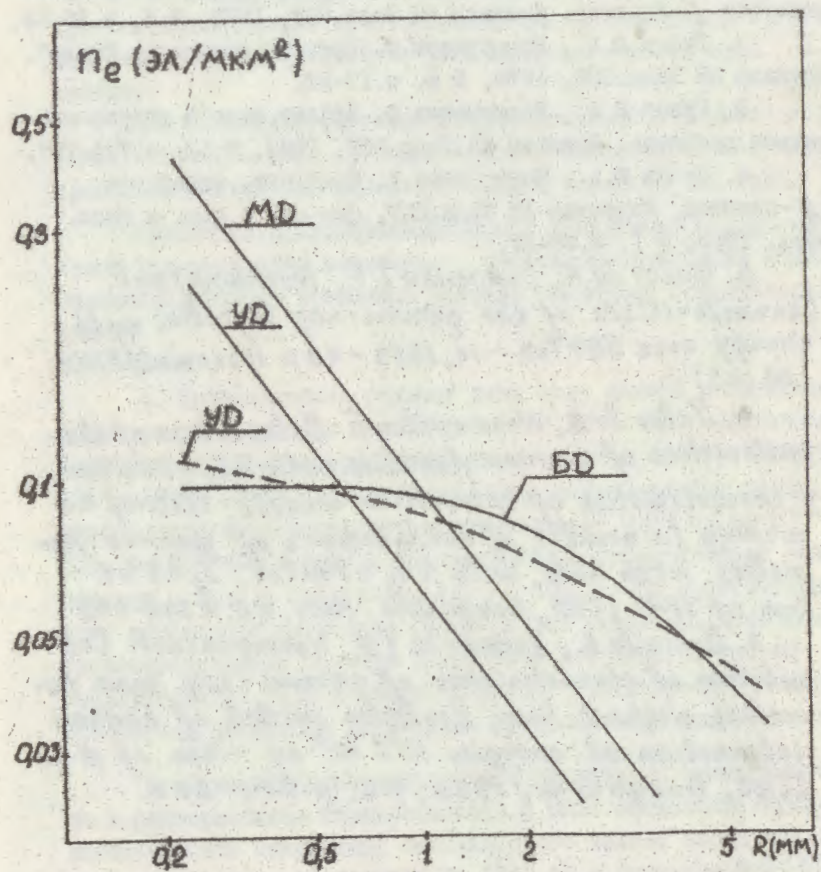


Рис. 1

Примеры распределений плотности электронов n_e в гало в гамма-квантовых семействах с энергией $\sum E_p \approx 2000 \text{ ТэВ}$ ($E_p \rightarrow 2 \text{ ТэВ}$) генерированных первичными протонами в случае разных моделей.

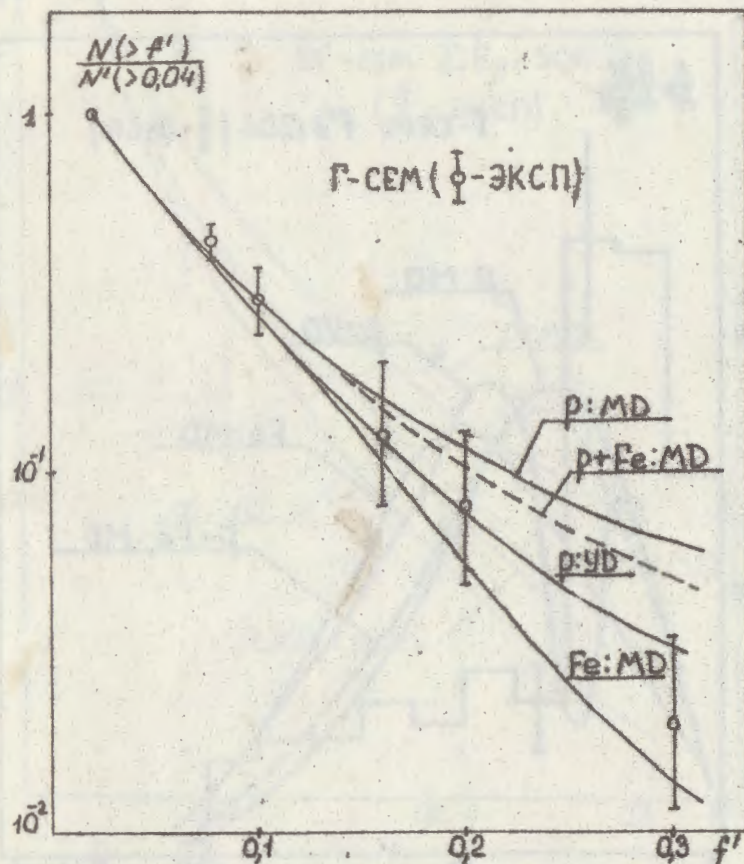


Рис. 2

Нормированное интегральное распределение по f' гамма-квантов ($f' \geq 0,04$) в семействах с гало.

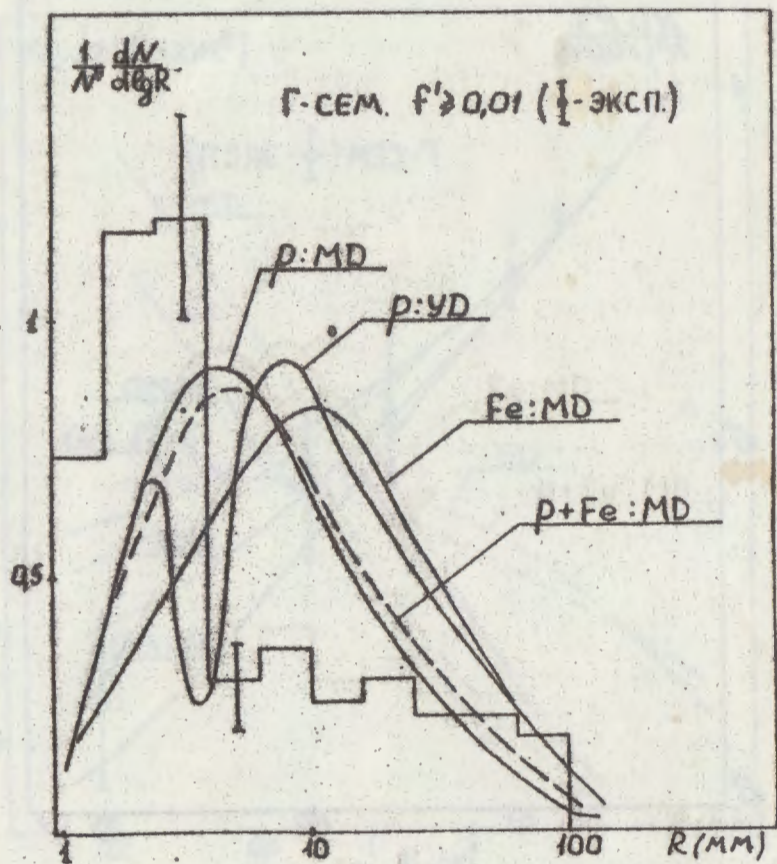


Рис. 3

Пространственное распределение гамма-квантов ($f' > 0,01$) в семействах с гало.

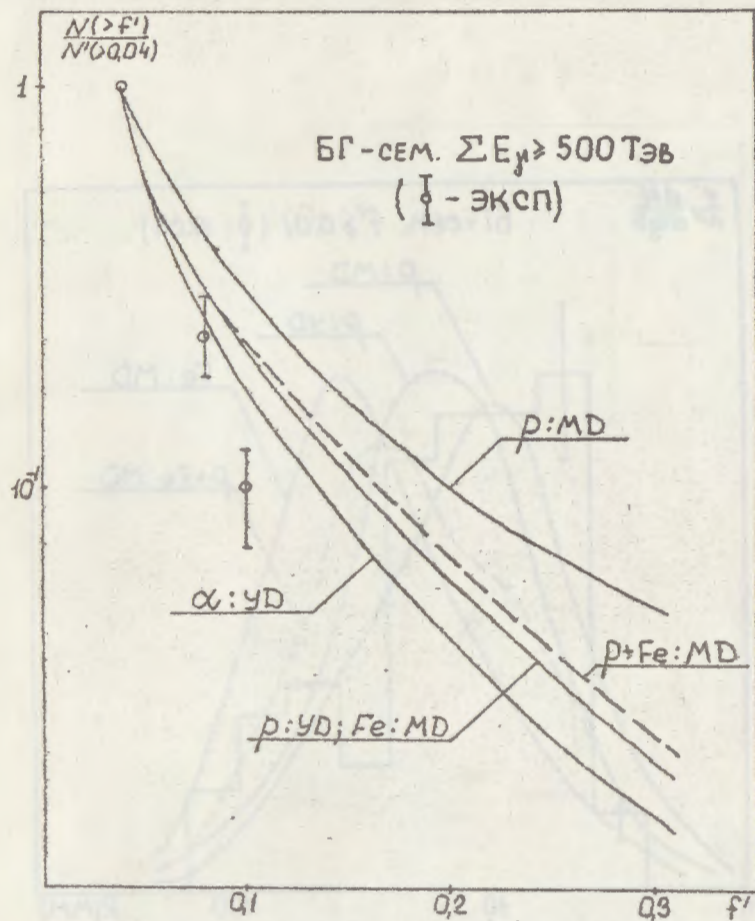
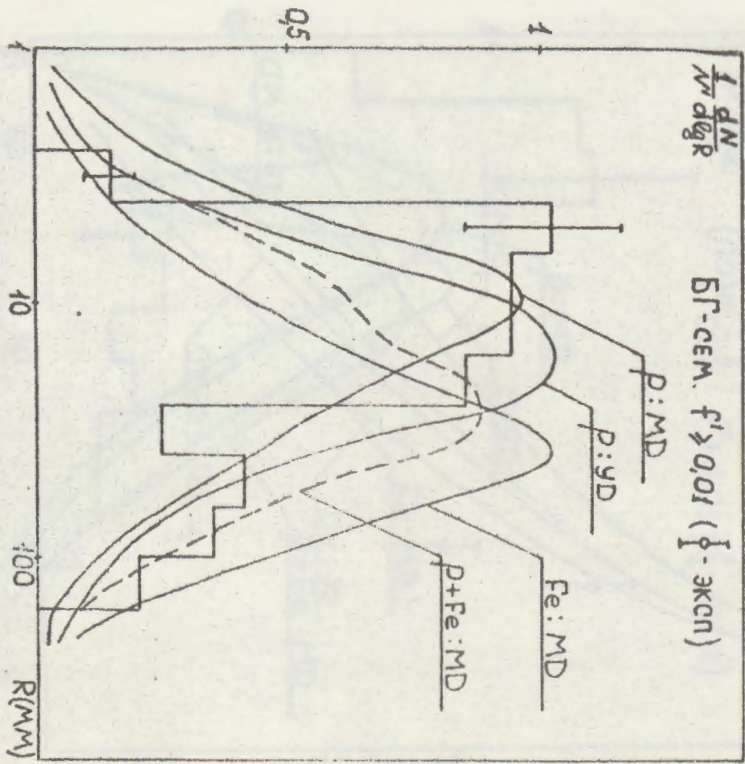


Рис. 4

Нормированное интегральное распределение по f' гамма-квантов ($f' > 0,04$) в суперсемействах без гало ($\Sigma E_\gamma > 500$ ТэВ, $E_\gamma > 2$ ТэВ).



Пространственное распределение галактик-квантов ($f' \geq 0,01$) в супергалактиках без гало ($\sum E_{\gamma} \geq 500$ ТэВ, $E_{\gamma} \geq 2$ ТэВ).

Подписано в печать 23.09.83г. Л1 03656, заказ № 364,
 завод ТСО, формат 60x84 1/16 л.т. 0054м 1 г.т.
 Типография ХСЗУ 71 Славина Талт. ССР