

На правах рукописи

Хорхе Котсоми Палета
(Jorge Cotzomi Paleta)

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИРОКИХ
АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ С ЧИСЛОМ ЧАСТИЦ 10^7 - 10^8 НА УРОВНЕ
МОРЯ И МАССОВЫЙ СОСТАВ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ПРИ ЭНЕРГИЯХ 10^{17} - 10^{18} эВ

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва

2010

Работа выполнена в отделе частиц сверхвысоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Калмыков Николай Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Роганова Татьяна Михайловна
НИИЯФ МГУ (ОИВМ)

доктор физико-математических наук
Троицкий Сергей Вадимович
ИЯИ РАН

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн РАН
г. Троицк

Защита состоится « 15 » октября 2010 года в 15.00 часов. на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г.Москва, Ленинские горы д.1, стр.5 «19 корпус НИИЯФ МГУ», аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 9 » сентября 2010 г.

Учёный секретарь Совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
Д.501.001.77
доктор физико-математических наук,
профессор

С. И. Страхова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы:

Исследование состава и энергетического спектра космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий является одной из актуальных задач физики космических лучей, поскольку эти экспериментальные данные важны для выяснения природы происхождения космических лучей и характера их распространения. Согласно экспериментальным данным в энергетическом спектре КЛ при описании его зависимостью $\sim E^{-\gamma}$ при энергии $(3-5) \cdot 10^{15}$ эВ наблюдается излом, соответствующий изменению показателя спектра γ на 0.3-0.4.

Исследование массового состава первичных КЛ в области энергии излома и до 10^{17} эВ давно проводится на установке ШАЛ МГУ. Убедительно показано уменьшение доли протонов и увеличение доли тяжелых ядер после излома, что и следует ожидать, если критическая энергия, при которой излом наблюдается для ядер с различным зарядом Z , пропорциональна Z . Такого рода зависимость естественным образом возникает, если связывать происхождение излома с диффузионной моделью распространения КЛ или с достижением максимальной энергии при ускорении в источнике.

При энергиях выше 10^{17} эВ массовый состав исследовался в относительно немногих экспериментах. Между тем, эта область энергий заслуживает тщательного изучения, поскольку именно в ней следует ожидать появления космических лучей иного происхождения по сравнению с теми, которые наблюдаются при более низких энергиях и связываются со взрывами сверхновых в нашей Галактике.

Как показывают экспериментальные данные, излом в парциальных энергетических спектрах при энергии $\sim 10^{17}$ эВ достигается уже и для ядер железа, однако показатель энергетического спектра всех частиц при энергиях выше 10^{17} эВ сохраняет то же значение, что и при энергиях 10^{16} –

10^{17} эВ. Поэтому, начиная с энергии $\sim 10^{17}$ эВ, в потоке первичных КЛ должен все больше проявляться вклад КЛ от источников иного происхождения, например, экстрагалактических. Окончательных аргументов в пользу такого заключения пока еще нет, поэтому необходимы дальнейшие экспериментальные исследования в этой области энергий.

Цель работы:

По данным установки ШАЛ МГУ провести анализ функций пространственного распределения (ФПР) заряженных частиц и мюонов в ШАЛ в зависимости от полного числа частиц в диапазоне $N_e \sim 10^7 \div 10^8$ для зенитных углов ШАЛ $\theta < 30^\circ$.

Провести сравнение экспериментальных ФПР заряженных частиц, полученных на различных установках: Якутск, AGASA и ШАЛ МГУ в диапазоне $N_e > 10^7$.

Исследовать экспериментальную зависимость плотности мюонов от мощности ливня в диапазоне $N_e \sim 10^6 \div 10^8$.

Определить вклад дополнительной (не связанной с основной массой галактических космических лучей, генерируемых в оболочках сверхновых) компоненты первичных космических лучей в диапазоне $N_e \sim 10^7 \div 10^8$.

Оценить долю гамма-квантов в составе первичного космического излучения при энергии выше 10^{17} эВ.

Основные результаты работы:

- Показано, что экстраполяция энергетического спектра первичных космических лучей (ПКЛ), дающего оптимальное согласие с экспериментальными данными для $N_e \leq 10^7$, не позволяет описать спектр по N_e при $N_e > 10^7$, поскольку расчетный спектр при такой экстраполяции идет существенно ниже экспериментального. Это указывает на существование в

потоке ПКЛ дополнительной компоненты, отличной от основной массы ГКЛ, генерируемых ударными волнами.

- Получена аппроксимация спектра ШАЛ в диапазоне $10^7 < N_e < 10^8$, генерированных дополнительной компонентой ПКЛ. Значение показателя спектра оказывается близким к тому, что наблюдается до первого излома.
- В предположении, что дополнительная компонента состоит из протонов, определена аппроксимация ее энергетического спектра.
- Определена величина $\langle \ln A \rangle$ - средний логарифм массового числа ПКЛ – (эта характеристика обычно используется для количественного описания массового состава ПКЛ). Показано, что $\langle \ln A \rangle \approx 3.2$ при $N_e \leq 10^7$, а далее снижается. При учете дополнительной компоненты при $N_e \approx 3 \cdot 10^7$ $\langle \ln A \rangle \approx 2.3$ и при $N_e \approx 10^8$ $\langle \ln A \rangle \approx 1.7$. Эти данные также подтверждаются анализом мюонной компоненты ШАЛ.
- По данным о мюонной компоненте ШАЛ (пороговая энергия мюонов 10 ГэВ) получена оценка доли гамма-квантов в потоке ПКЛ при энергии выше 10^{17} эВ. Эта величина оказалась равной $(2.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$

Вклад автора:

Автор модернизировал программу для обработки экспериментальной информации, содержащейся в банке данных установки ШАЛ МГУ, провел обработку всей статистики зарегистрированных событий с числом частиц $N_e > 10^7$.

Получил оценку вклада дополнительной компоненты и возможной доли гамма-квантов в потоке ПКЛ при энергиях $\approx 10^{17}$ - 10^{18} эВ с помощью моделирующих программ AIRES и CORSIKA (использовалась модель взаимодействия QGSJET при высоких энергиях).

Выступал с докладами на двух конференциях и принял участие в написании публикаций.

Научная новизна работы:

В настоящее время достаточно активно обсуждается вопрос о роли внегалактического космического излучения при энергиях выше 10^{17} эВ, однако, экспериментальных исследований в этом направлении сделано еще очень мало. Поэтому полученные в диссертации результаты о спектре дополнительной компоненты обладают существенной новизной. Также существенно новой является оценка доли гамма-квантов в космическом излучении в рассматриваемом и еще мало изученном с этой точки зрения интервале первичных энергий.

Практическая значимость:

Большой экспериментальный материал, полученный на установке ШАЛ МГУ (более 10^6 ливней, зарегистрированных за период 1982-1990 гг., в том числе примерно 10^3 ливней с энергией не менее 10^{17} эВ), позволяет с наибольшей среди существующих установок статистикой исследовать массовый состав и энергетический спектр ПКЛ в широком диапазоне первичных энергий от 10^{15} до 10^{18} эВ.

Апробация работы:

Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях, семинарах и научных школах:

1. Международное совещание “Управление движением малогабаритных спутников”, Москва, Апрель 2007.
2. 30th International Cosmic Ray Conference, Merida, Mexico, July 2007.
3. 30-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Санкт-Петербург, Июль 2008.
4. Физические чтения, FCFM BUAP, Пуэбла, Мексика, Сентябрь 2008.

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 3 работы:

1. Х. Котсоми Палета, *Анализ функций пространственного распределения заряженных частиц широких атмосферных ливней*

по данным установок Якутск, AGASA и МГУ, препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, № 23 (2007) с. 19-22.

J. Cotzomi, Yu. A. Fomin, N. N. Kalmykov, G. V. Kulikov, V. P. Sulakov, *Some remarks about lateral distribution function of charged particles at energy above 10^{17} eV*, Proc. 30th ICRC, Mérida, Vol. 4 (2007) p. 183-187.

2. Н. Н. Калмыков, Х. Котсоми, В. П. Сулаков, Ю. А. Фомин, *Изменение массового состава первичного космического излучения при энергии выше 10^{17} эВ по данным установки ШАЛ МГУ*, Вестн. Моск. ун-та., Физ. Астрон. **3**, № 5 (2008) с. 62-64.
3. Н. Н. Калмыков, Х. Котсоми, В. П. Сулаков, Ю. А. Фомин, *Состав первичного космического излучения в области $10^{17} - 10^{18}$ эВ по данным установки ШАЛ МГУ*, Известия РАН. Серия физическая **73**, № 5, (2009) с. 584-586.

Структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Содержит 23 рисунка и 2 таблицы; список литературы включает 83 наименования. Объем диссертации 114 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации. Формулируется основная цель работы. Приводится структура и краткое содержание глав диссертации. Указан личный вклад автора в работу, кратко изложены основные результаты, новизна, практическая и научная ценность работы.

В **первой главе** приведён обзор возможных астрофизических механизмов ускорения космических лучей сверхвысоких энергий. Описывается механизм ускорения заряженных частиц в активных

космических объектах, таких, как остатки сверхновых, галактический ветер, ядра галактик, квазары, и т.д. Этот механизм обусловлен ускорением частиц в облаках магнитной плазмы, которая находится обычно во всех системах, где возникают ударные волны, как, например, в остатках сверхновых, или в радио-галактиках. В качестве наиболее вероятных кандидатов на роль галактических источников КЛ традиционно рассматриваются остатки сверхновых.

Получено, что спектр ускоренных частиц является степенным с показателем степени $\gamma_{src} \sim 2$ [1, 2]. Около максимальной энергии ускорения E_{max} спектр оказывается более жестким - $\gamma_{src}=1.75$. Учет нелинейных эффектов позволяет поднять величину E_{max} до энергий около 300 ТэВ [2]. Однако и это не предел. В работах [3, 4] было показано, что КЛ, как потоки заряженных частиц на фронте ударной волны, несущие значительную энергию оболочки сверхновой, являются нестабильными. Потоковые неустойчивости приводят к генерации ими магнито-гидродинамических волн, т. е. случайных магнитных полей в области перед фронтом ударной волны. Такое усиление магнитного поля было обнаружено телескопом Чандра в сверхновой Тихо Браге [5,6]. Таким образом, максимальная энергия ускорения протонов КЛ на фронте ударной волны в расширяющейся оболочке сверхновых при обычных параметрах среды достигает 10^{15} эВ, то есть может сравняться с энергией, при которой наблюдается колено. Суммируя вышесказанное, можно заключить, что теории ускорения частиц КЛ на фронте ударной волны обеспечивают спектр в источниках с показателем степени при энергии $\gamma_{src} = 2 \div 2.1$ вплоть до максимальной энергии ускорения, которая в настоящее время достигла энергии излома в энергетическом спектре ПКЛ.

Во второй главе приведено описание установки ШАЛ МГУ, предназначенной для регистрации ШАЛ с числом частиц 10^5-10^8 .

Установку ШАЛ МГУ [7] можно отнести к классу компактных. Эффективная площадь регистрации для больших ливней достигает 0.5 км^2 . Установки AGASA [8] и Якутск [9] относятся к раздвинутым. Расстояние между детекторами в Якутске – от 500 до 1000 м. а в AGASA 1000 м., что не позволяет с достаточной точностью определять полное число частиц. Поэтому на этих установках в качестве классификационного параметра применяется плотность на фиксированном расстоянии (600 м) от оси ШАЛ.

На установке ШАЛ МГУ для измерения плотности потока заряженных частиц ШАЛ использовались счётчики Гейгера-Мюллера не имеющие переходного эффекта по сравнению со случаем, когда применяются сцинтилляционные детекторы. Такая система, учитывая простоту и ясность обработки, позволяет более точно оценивать положение оси индивидуальных ШАЛ и получать статистические оценки средних ФПР.

Наличие в составе установки ШАЛ МГУ мюонных детекторов общей площадью 80 м^2 позволяет измерять плотности мюонов с энергией выше 10 ГэВ в ШАЛ. Используются четыре группы счетчиков Гейгера-Мюллера с площадью 0.033 м^2 , расположенные на глубине 40 м в.э. под землёй. Данные о 10 ГэВ-ных мюонах являются уникальными.

Описаны центральная и периферийная системы отбора ливней. Описана методика вычисления основных параметров ШАЛ: направления прихода (θ, φ), положения оси ШАЛ (x, y), полного числа частиц (N_e) и параметра функции пространственного распределения (s). Приведена методика построения средней функции пространственного распределения (ФПР) с использованием метода максимума функции правдоподобия.

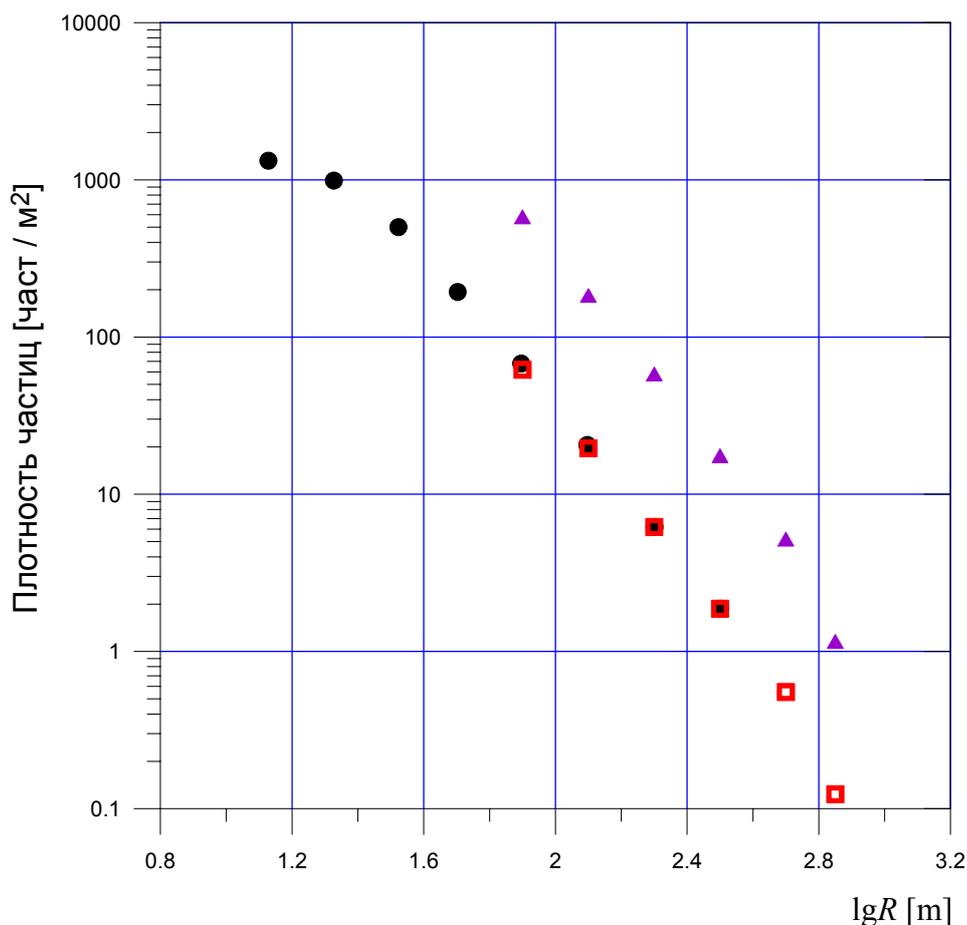


Рис. 1. ФПР ШАЛ с числом частиц $N_e > 10^8$ (▲); ФПР ШАЛ с числом частиц $N_e > 10^7$ (●); ФПР ШАЛ с числом частиц $N_e > 10^8$, совмещенная с ФПР ШАЛ с числом частиц $N_e > 10^7$ на расстоянии 200 м от оси (■).

На рис. 1 приведены экспериментальные ФПР заряженных частиц, полученные по банку данных установки ШАЛ МГУ. Были отобраны ливни с полным числом частиц выше 10^7 с шагом $\Delta \lg N_e = 0.2$, и углы направления прихода $\theta < 30^\circ$, с параметрами возраста ШАЛ $0.6 < s < 1.4$. построены их средние ФПР заряженных частиц. В результате обработки было найдено 1679 ливней, удовлетворяющих этим условиям.

В третьей главе описано определение полного числа частиц в ШАЛ. Оно производится с использованием априорной ФПР заряженных частиц.

В качестве классификационного параметра для построения энергетического спектра бралось полное число заряженных частиц в ШАЛ.

Экспериментальные данные установки ШАЛ МГУ для диапазона $\lg N_e > 7$ и направлений прихода $\theta < 30^\circ$ можно хорошо описать эмпирической формулой, предложенной Линсли [10].

$$\rho(r) = (N / R_m^2) \cdot C(\alpha, \eta) \cdot (r / R_m)^{-\alpha} \cdot (1 + r / R_m)^{-(\eta - \alpha)} \quad , \quad (1)$$

где $C(\alpha, \eta) = \Gamma(\eta - \alpha) \cdot [2\pi \cdot \Gamma(2 - \alpha) \cdot \Gamma(\eta - 2)]^{-1}$, величина мольеровского радиуса $R_m = 80$ м, параметры α и η равны 1.3 и 3.0 соответственно.

Значение параметра α близко к значениям, используемым для описание ФПР, полученным на установках Якутск и AGASA.

Как показал анализ, та же ФПР хорошо описывается аппроксимацией, используемой на установке ШАЛ МГУ для ливней меньшей мощности. Это аппроксимация представляет собой обычную функцию Нишимуры – Каматы – Грейзена, но параметр возраста S считается зависящим от расстояния до оси ШАЛ.

Однако теоретическая ФПР, полученная в работе [11] и хорошо описывающая данные установки AGASA, не позволяет описать данные установки ШАЛ МГУ.

На рис. 2 приведены ФПР заряженных частиц полученные на установках AGASA [8] и Якутск [9], а также в настоящей работе. Поскольку эти данные характеризуются различными значениями мольеровских радиусов, результаты представлены в масштабе r/R_m . Данные нормированы по абсолютной величине на расстоянии 600 м от оси.

Сравнение результатов различных установок показывает, что согласие можно считать хорошим, за исключением области малых расстояний от оси ($r/R_m \leq 0.5$). С одной стороны, на таких расстояниях возможна переоценка плотности заряженных частиц в сцинтилляционных детекторах

за счет переходного эффекта. Но, кроме того, надо учесть, что при плотностях, превосходящих 10^3 частиц/м², начинает сказываться занижение реальной плотности в связи с насыщением детекторов, использующих счетчики Гейгера-Мюллера.

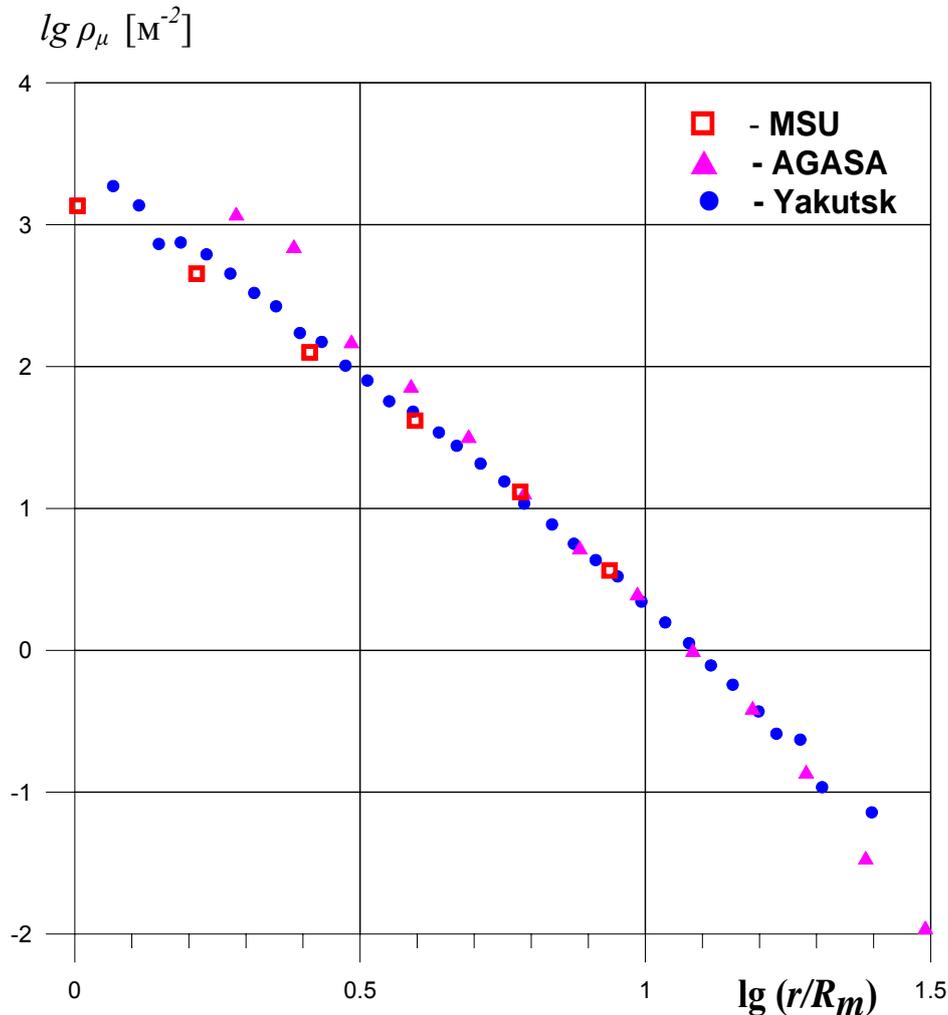


Рис. 2. Результаты сравнения экспериментальных данных ШАЛ МГУ, AGASA и Якутск.

Надо подчеркнуть, что аппроксимации, используемые для описание экспериментальных данных установок Якутска и AGASA, противоречат друг другу значительно сильнее, чем непосредственные экспериментальные данные.

В четвёртой главе приведены результаты исследования энергетического спектра и массового состава ПКЛ, а также определения вероятной доли гамма-квантов в первичном излучении при энергии выше

10^{17} эВ. Используя экспериментальный банк данных установки ШАЛ МГУ для событий с числом частиц выше 10^7 и по числу мюонов с пороговой энергией 10 ГэВ, мы провели оценку возможного вклада дополнительной (или экстрагалактической) компоненты КЛ, в предположении, что дополнительная компонента состоит из протонов.

В работе [12] было показано, что наилучшее описание экспериментальных данных установки ШАЛ МГУ по электронной и мюонной компонентам для ливней с N_e от 10^5 до 10^7 достигается при условии, что показатель парциальных энергетических спектров различных групп ядер меняется при критической энергии $E_{kp}(Z)=Z \cdot E_{kp}(1)$ с 2.7 на 3.7. В этом соотношении Z - заряд данной группы ядер, величина $E_{kp}(Z=1)$ составляет $3.5 \cdot 10^{15}$ эВ. Таким образом, при $E_0 > 10^{17}$ эВ излом достигается уже для ядер железа, так что показатель спектра всех частиц должен был бы соответствовать показателю парциального спектра за изломом, т.е. составлять примерно 3.7. Однако этого не происходит, и величина показателя спектра всех частиц в диапазоне 10^{17} - 10^{18} эВ остается почти такой же, как в области 10^{16} - 10^{17} эВ. Отсюда можно заключить, что при энергии 10^{17} эВ и выше должна существовать дополнительная компонента космических лучей, происхождение которой отлично от происхождения космических лучей вблизи излома. Можно оценить вклад этой компоненты, если из наблюдаемого спектра ШАЛ по числу частиц вычесть спектр, соответствующий экстраполяции парциальных спектров, меняющих свой показатель с 2.7 на 3.7 при $E_{kp}(Z)$, на область выше 10^{17} эВ.

Мы использовали экспериментальные данные и экстраполяцию расчетного спектра на область более высоких энергий для того, чтобы определить, какое количество ливней обусловлено дополнительной компонентой ПКИ. При этом получился результат, показанный на рис. 3. Спектр, обусловленный дополнительной компонентой, можно приближенно описать соотношением,

$$I_d(N_e) = 1.55_{-0.43}^{+0.62} \cdot 10^{-21} \cdot (N_e / 10^7)^{-2.36 \pm 0.08} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}, \quad (2)$$

для $10^7 < N_e < 10^8$.

$$\lg[I(N_e) \cdot (N_e / 10^5)^{2.4}], \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$$

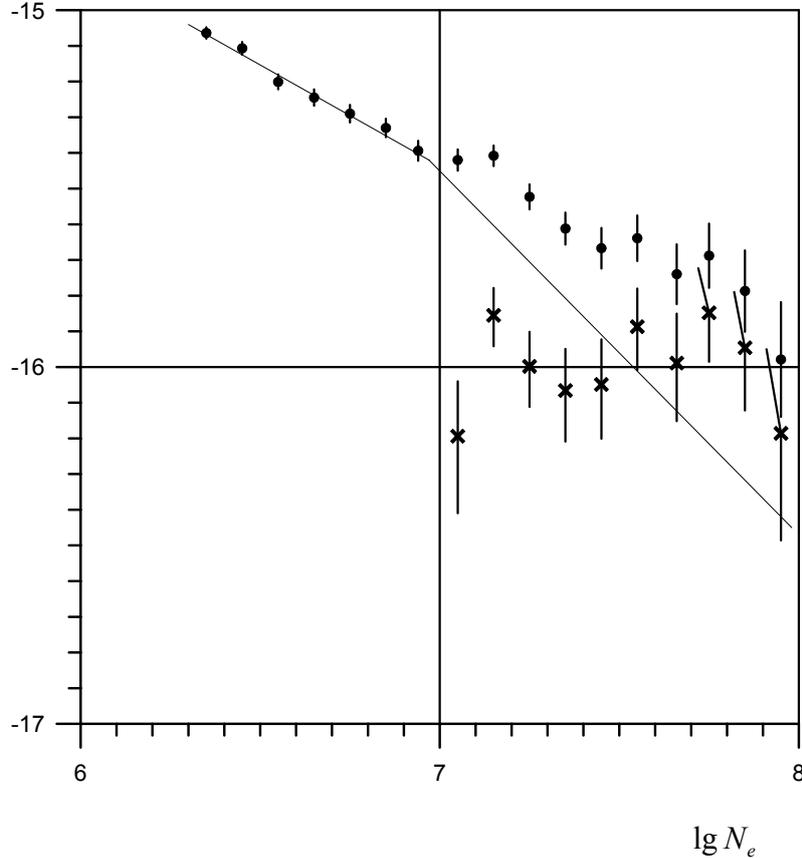


Рис. 3. Экспериментальный спектр ШАЛ по числу частиц по данным установки ШАЛ МГУ (•), расчётный спектр ШАЛ (сплошная кривая) и спектр ШАЛ, генерированных дополнительной компонентой ПКИ (x).

Значение показателя спектра (2.36 ± 0.08) оказывается близким к значению показателя (≈ 2.4) до излома при $3 \cdot 10^{15}$ эВ [13]. Считая, что дополнительная компонента состоит из протонов, при использовании модели QGSJET [14] можно получить энергетический спектр дополнительных протонов в виде

$$I_d(E_0) = 0.66_{-0.18}^{+0.26} \cdot 10^{-31} (E_0 / 10^{17})^{-2.55 \pm 0.09} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1} \text{ эВ}^{-1} \quad (3)$$

Естественно, что интенсивность дополнительной компоненты сильно зависит от предположений о величине излома парциальных спектров $\Delta\gamma$.

Наличие этой компоненты сказывается на величине $\langle \ln A \rangle$ - характеристики, обычно используемой для количественного описания массового состава. Согласно результатам нашего анализа, величина $\langle \ln A \rangle$ составляет $\approx 3.2 \pm 0.3$ при $N_e \approx 10^7$, при $N_e \approx 3 \cdot 10^7$ $\langle \ln A \rangle = 2.3 \pm 0.3$, а при $N_e \approx 10^8$ $\langle \ln A \rangle$ снижается до 1.7 ± 0.3 .

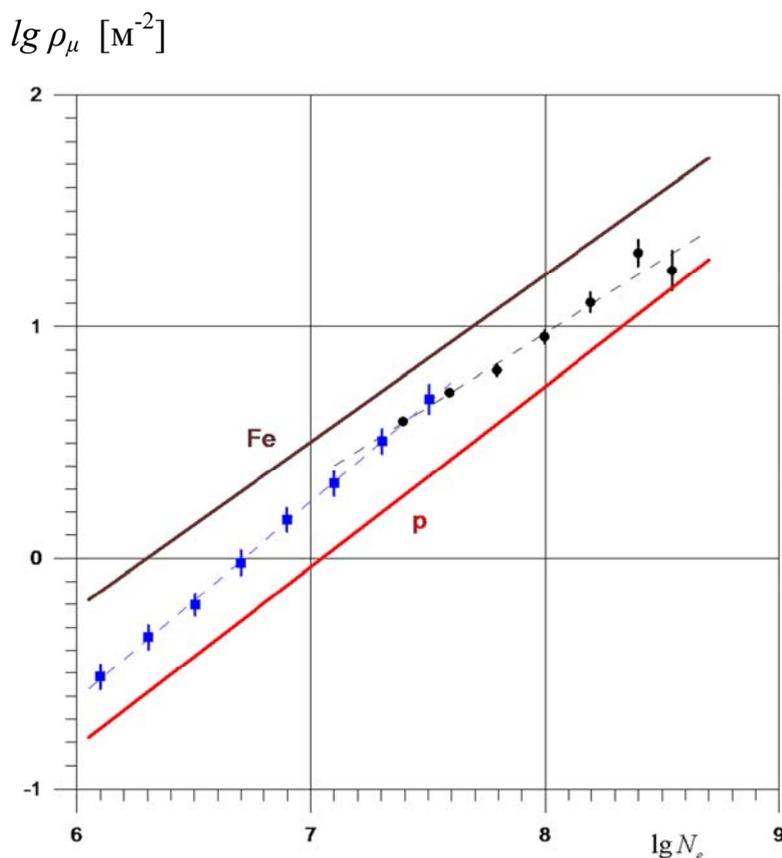


Рис. 4. Зависимость плотности мюонов на расстоянии 50 м от оси ШАЛ от мощности ливня. Линии с обозначениями *Fe* и *p* – результаты расчета по модели QGSJET для первичных ядер железа и протонов соответственно. ■ – экспериментальные точки, полученные по данным центрального мюонного детектора, ● – экспериментальные точки, полученные по данным четырех мюонных детекторов.

Аналогичное заключение о массовом составе было получено на основе анализа экспериментальных данных установки ШАЛ МГУ по мюонной компоненте. По показаниям четырех мюонных детекторов были построены ФПР мюонов для ливней в широком диапазоне по числу частиц от 10^6 до $4 \cdot 10^8$. На основании этих данных была определена зависимость средней плотности мюонов ρ_μ от числа электронов N_e на расстоянии 50 м от оси

ливня. Выбор расстояния 50 м связан с тем, что для него плотность мюонов определяется с достаточно хорошей статистической точностью во всем регистрируемом установкой ШАЛ МГУ диапазоне по числу частиц. Полученная зависимость ρ_μ ($r=50\text{м}$) от N_e (рис. 4) как и в случае дополнительной компоненты показывает тенденцию уменьшения среднего массового числа первичных частиц для более мощных ливней.

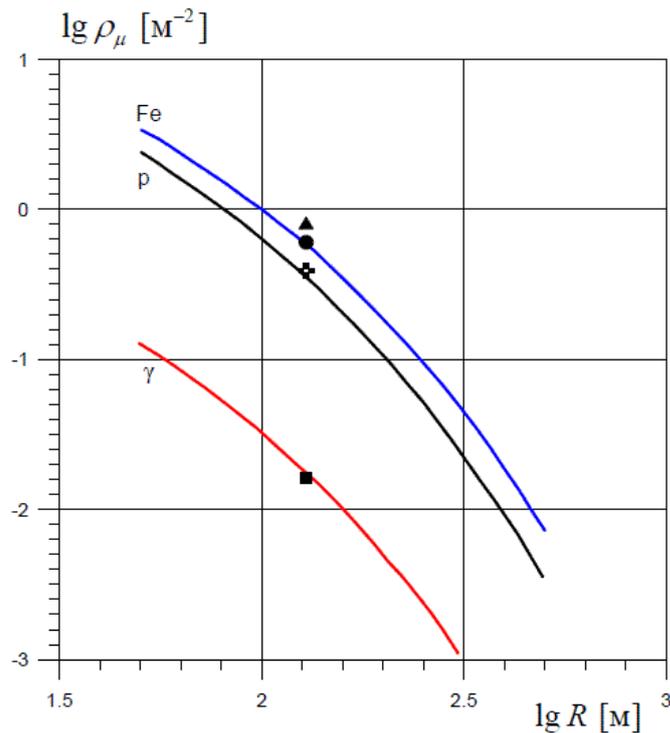


Рис. 5. Средние функции пространственного распределения мюонов с энергией > 10 ГэВ в ШАЛ, генерированных первичными ядрами железа, протонами и гамма-квантами с первичной энергией 10^{17} эВ. Точки: ● - экспериментальная плотность, которая в среднем соответствует зарегистрированному ливню с числом частиц $2.66 \cdot 10^7$, на расстоянии 128 м от оси ливня; ▲, ⊕, и ■ - теоретические значения средних плотностей для ливней, генерированных ядром железа, протоном и гамма-квантом соответственно.

Наличие в составе установки ШАЛ МГУ детекторов мюонов общей площадью 80 м^2 позволяет оценить долю гамма-квантов в потоке ПКИ при энергии выше 10^{17} эВ. Метод оценки основан на том, что в ШАЛ достаточно большого размера ($\geq 10^7$) отсутствие попадания хотя бы одного мюона с энергией более 10 ГэВ в подземный детектор является

событием маловероятным, если ось ШАЛ лежит в пределах круга радиуса 240 м от мюонного детектора и ливень создан протоном или более тяжелым ядром. В то же время такого рода события вполне совместимы с гипотезой, что ливень создан первичным гамма-квантом, поскольку в таком ливне плотность распределения мюонов существенно снижается по сравнению с обычными ливнями (рис.5). Полная статистика обработанных ливней включает 1679 ливней, при этом общее число нулей составляет 48, тогда как из проведенных оценок следует, что оно при данной статистике и в предположении отсутствия гамма-квантов в ПКИ должно составлять около 5. Таким образом, приходим к оценке доли гамма-квантов в ПКИ при энергии 10^{17} - 10^{18} эВ, равной $(2.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$.

В **заклучении** приведены основные результаты и выводы настоящей работы.

Цитируемая литература

1. Ellison D. C., et al., *Galactic Rays from Supernova Remnants: II Shock Acceleration of Gas and Dust*, Ap. J. **487** (1997) p. 197-217.
2. Бережко Е. Г., Ксенофонтов Л. Т., *Состав космических лучей, ускоренных в остатках сверхновых*, ЖЭТФ **116**, № 3(9), (1999) с. 737-759.
3. Bell A. R., Lucek S. G., *Cosmic Ray Acceleration to Very High Energy Through the Non-Linear Amplification by Cosmic Rays of the Seed Magnetic Field*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **321** Issue 3 (2001) p. 433-438.
4. Ptuskin V. S. Zirakashvili V. N., *On the Spectrum of High-Energy Cosmic Rays Produced by Supernova Remnants in the Presence of Strong Cosmic-Rays Streaming Instability and Wave Dissipation*, Astron. Astrophys. **429** (2005) p. 755-765.
5. Hwang et al., *Thermal and Nonthermal Emission from the Forward Shock in Tycho's Supernova Remnant*, Astrophys. J. **581** (2002) p. 1101-1115.

6. Bamba, *Fine Structures of Shock of SN 1006 with the Chandra Observation*, *Apl. J.* **589** (2003) p. 827-851.
7. Вернов С. Н., Христиансен Г. Б., Атрашкевич В. Б., и др., *Новая установка МГУ для изучения широких атмосферных ливней с энергией до 10^{18} эВ*. Изв. АН СССР, сер. физ., т **44** (1980) с. 537-543.
8. S. Yoshida et al., *Lateral distribution of charged particles in giant air showers above 1 EeV observed by AGASA*, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **20** (1994) p. 651-664.
9. A. V. Glushkov et. al., *Electrons and muons in Extensive Air Showers of energies $E_0 \geq 3 \times 10^{17}$ eV: Yakutsk array data and QGSJET model*, *Yad. Fiz.* **63**, № 8 (2000) p. 1557-1568.
10. Linsley J., Scarsi L., Rossi B., *Energy Spectrum and Structure of Large Air Showers*, *J. Phys. Soc. Japan.* V.17, Suppl. A-III, (1962) p. 91.
11. R.I. Raikin et al., *The Shape of EAS Lateral Distribution and Primary Composition of the Cosmic Rays*, *Proc. 27th ICRC, Hamburg, v.1, (2001)* p. 290-293.
12. Н. Н. Калмыков, В. Н. Калмыков, Г. В. Куликов, В. П. Сулаков, Ю. А. Фомин, *Энергетический спектр легких ядер первичного космического излучения по данным установки ШАЛ МГУ*, *Вестн. Моск. ун-та., Физ. Астрон.* **3**, № 6 (2008) с. 56-58.
13. Fomin Yu. A., Kalmykov N. N., Khrenov B. A., et. al., *The 10^{15} - 10^{18} eV super high – energy primary cosmic rays: energy spectrum, nuclear composition, points sources*. *Proc. 20th ICRC, Moscow, Nauka vol. 1 (1987)* p. 397-400.
14. Kalmykov N. N., Ostapchenko S. S., Pavlov A. I., *Quark-gluon-string model and EAS simulation problems at ultra-high energies*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **52B** (1997) p.17-28.

Хорхе Котсоми Палета
(Jorge Cotzomi Paleta)

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИРОКИХ
АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ С ЧИСЛОМ ЧАСТИЦ 10^7 - 10^8 НА УРОВНЕ
МОРЯ И МАССОВЫЙ СОСТАВ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ПРИ ЭНЕРГИЯХ 10^{17} - 10^{18} эВ

Автореферат

Подписано в печать 31.05.2010

Тираж 100 экз. Заказ № Т-108

Отпечатано в типографии КДУ

Тел./факс: (495) 939-44-91, 939-57-32, www.kdu.ru