

# Спектр ШАЛ в области "излома" по результатам эксперимента МАКЕТ - АНИ

С. Казарян<sup>1</sup>, Г. Карагезян<sup>1</sup>, Э. Мамиджаниян<sup>1,2</sup>, Л. Мелкумян<sup>1</sup>,  
Г. Овсепян<sup>1</sup>, С. Сохоян<sup>1</sup>, С. Тер-Антонян<sup>1</sup>, А. Чилингарян<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Отделение Физики Космических Лучей, Ереванский Физический Институт, Ереван 375036, РА

<sup>2</sup> Физический институт имени П.Н. Лебедева, Ленинский пр.53, 117924, Москва, РФ

## Аннотация

Представлены дифференциальные спектры ШАЛ, измеренные на установке МАКЕТ-АНИ, расположенной на высоте 3200 м. над уровнем моря. Представлена зависимость наблюдаемого спектра по  $N_e$  от зенитного угла ШАЛ. Исследована возможность отбора компонент первичного космического излучения по параметру возраста  $s$ . Получена оценка сечения неупругого взаимодействия протон-ядро воздуха для энергий  $10^{15} - 10^{16}$  эВ.

## 1 Введение

Существование излома в спектре широких атмосферных ливней (ШАЛ) является общепризнанным фактом, однако, противоречивые результаты зависимости формы спектра от высоты расположения установки и зенитного угла ШАЛ [1-4], требуют более детального исследования спектров по  $N_e$  в области излома. Установка МАКЕТ-АНИ [5] нацелена на регистрацию ШАЛ с числом частиц  $N_e \geq 5 \cdot 10^4$ , генерированных ПКИ с энергиями  $E_0 \geq 10^{14}$  эВ. Координаты оси ливня и параметр возраста  $s$  восстанавливаются методом минимизации функционала с использованием НКГ аппроксимации [6]. Точность восстановления числа частиц в ливне  $N_e \sim 10 - 15\%$ , оси ливня -  $\sim 2$  м, параметра возраста  $\sigma_s \simeq 0.1$ . Угловые координаты ШАЛ определяются хронотронной системой с точностями  $\sigma(\theta) \leq 1.5^\circ$  и  $\sigma(\phi) \leq 6^\circ$  [7]. За время экспозиции  $T \simeq 9 \cdot 10^5$  сек, установкой зарегистрировано  $4.5 \cdot 10^6$  событий. Условиям  $N_e \geq 10^5$ ;  $0.3 \leq s \leq 1.7$ ;  $\theta \leq 50^\circ$  и локализации осей ШАЛ на площади, обеспечивающей  $\geq 95\%$  эффективность регистрации, удовлетворило  $\sim 3.5 \cdot 10^5$  событий.

## 2 Спектры по числу частиц в ШАЛ в области излома.

Экспериментальный материал был распределен по пяти равномерным (относительно  $Sec(\theta)$ ) угловым интервалам, для которых построены дифференциальные спектры по числу частиц в ШАЛ для логарифмически равномерных интервалов по  $N_e$ . По таблицам интенсивностей ШАЛ, измеренных на установках МАКЕТ-АНИ и KASCADE ( $X_0 = 1020\text{г}/\text{см}^2$ ) [4], получены точки излома и показатели спектров до и после излома, а также область излома [8,9]. В отличие от [9], накопленный статистический материал достаточен для увеличения раствора рассматриваемых углов до  $50^\circ$ . Последний угловой интервал при этом соответствует эффективной толщине атмосферы  $\sim 1040\text{г}/\text{см}^2$ , что позволяет непосредственно сравниваться с измерениями интенсивностей на установке KASCADE. Измеренные спектры приведены на рис.1. Точки излома спектров ШАЛ отмечены квадратами, линия соответствует изменению интенсивностей с пробегом  $\Lambda_N = 138\text{г}/\text{см}^2$ , а по оси  $N_e$  - с пробегом поглощения по числу частиц в ШАЛ  $\Lambda = 206 \pm 21\text{г}/\text{см}^2$ . Пробег поглощения по числу частиц в ШАЛ оценен по точкам изломов объединенных данных МАКЕТ-АНИ+KASCADE [9]. Наблюдается смещение точки излома при переходе к большим зенитным углам и при углах  $46^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$  достигает  $N_{e_k} \sim (6, \pm 1) \cdot 10^5$ . Основные характеристики спектра ШАЛ, измеренного установкой МАКЕТ-АНИ, приведены в табл.1. Данные получены экстраполяцией параметров дифференциального спектра по

Таблица 1: Основные параметры спектра ШАЛ, измеренного установкой МАКЕТ-АНИ, приведенные к вертикали ( $700\text{г}/\text{см}^2$ ).  
(в  $\text{м}^{-2}\text{сек}^{-1}\text{ср}^{-1}N_e^{-1}$ ).

$dI/dN_e$	$(1.84 \pm 0.18) \cdot 10^{-13} (N_e/N_{e_k})^\gamma$
$\gamma(N_e \leq N_{e_k})$	$-2.53 \pm 0.02$
$\gamma(N_e > N_{e_k})$	$-2.86 \pm 0.05$
$\Delta(N_{e_k})$	$(1.1 \pm 0.04) \cdot 10^6 - (2.57 \pm 0.07) \cdot 10^6$
$N_{e_k}$	$(1.59 \pm 0.3) \cdot 10^6$
$I(N_e \geq 10^6)$	$(3.51 \pm 0.03) \cdot 10^{-7} (\text{м}^{-2}\text{сек}^{-1}\text{ср}^{-1})$

$N_e$  для первого углового интервала ( $733\text{г}/\text{см}^2$ ) к вертикали ( $700\text{ г}/\text{см}^2$ ) с учетом пробега поглощения  $\Lambda_N = 138 \pm 6\text{г}/\text{см}^2$ . Из рис. 1 видно, что поведение спектров обеих установок

и их интенсивности хорошо согласуются, несмотря на разновысотность и методические особенности (калибровка детекторов, восстановление параметров ШАЛ и т.д.). Совместное использование данных двух установок, возможно, прояснит многие вопросы физики ШАЛ, недоступные при измерениях на одной установке, в частности, позволит исследовать усредненные каскадные кривые в большем диапазоне глубин.

### 3 Отбор ШАЛ по параметру возраста $s$

Для исследований вклада компонент ПКИ в наблюдаемый спектр по  $N_e$  проведено сравнение измеренного распределения параметра возраста с теоретически ожидаемым, рассчитанным по программе CORSIKA562 (NKG, QGSJET) [10]. В качестве первичного спектра использовались аппроксимации баллонных и спутниковых, с учетом изломов согласно модели Петерса. Восстановление параметров моделированных ливней проводилось аналогично [7], с учетом функции отклика установки. Наблюдаемое согласие модельных данных с экспериментальными позволило поставить задачу вклада компонент ПКИ в ливни отобранные по параметру  $s$ . Из анализа модельных данных можно сделать вывод, что «молодые» ( $0.3 < s \leq 0.8$ ) ливни, более чем 95%, генерированы легкими ядрами, а «старые» ( $1.2 < s \leq 1.7$ ) ливни - от 30% до 40% - тяжелыми ядрами. Правильность классификации, так называемых, «молодых» - «протонных» ливней можно проверить, оценив пробег поглощения отобранных событий. На рис. 2 показаны угловые распределения интенсивностей ШАЛ для «молодых» ливней с  $N_e \geq 10^5$  и  $N_e \geq 5 \times 10^5$  в сравнении со всеми ШАЛ. Наблюдаемый пробег поглощения «молодых» ливней оказался равным  $\Lambda_N = 109 \pm 10 \text{ г/см}^2$  для  $N_e \geq 10^5$  и  $\Lambda_N = 102 \pm 10 \text{ г/см}^2$  для  $N_e \geq 5 \cdot 10^5$ , соответственно. Полученные пробеги, по известным оценкам, соответствуют сечению неупругого взаимодействия  $\sigma^{in} \sim 350 \text{ mb}$  для первичных энергиях  $E_0 \sim 10^{14}$  [11].

### 4 Заключение:

На основе экспериментальных данных МАКЕТ-АНИ за 1997-2000 гг. получены следующие результаты:

1. В дифференциальном спектре ШАЛ по  $N_e$  наблюдается излом при  $N_{e_k} = 1.59 \pm$

$0.05 \cdot 10^6$ . Точка излома смещается в сторону меньших  $N_e$  с ростом эффективной толщины атмосферы в соответствии с пробегом  $\Lambda \sim 206 \pm 21 \text{ г/см}^2$ . Наклон спектра до излома  $\gamma(N_e \leq N_{ek}) = -2.53 \pm 0.02$ , после излома -  $\gamma(N_e > N_{ek}) = -2.86 \pm 0.05$

2. Отбор «молодых» ливней позволяет выделять ливни, образованные от «первичных» протонов.

Приведенные результаты основаны на экспериментальных данных установки МАКЕТ-АНИ, созданной сотрудничеством ЕрФИ (Армения) и ФИАН (Россия) (Коллаборация АНИ). Авторы выражают благодарность коллегам из ФИАН, в частности, Н. Кабановой, С. Блохину за продолжающийся вклад и помощь в работе установки и анализе данных. Авторы особо благодарны С.И. Никольскому и В.А. Ромахиному за интерес и конструктивное обсуждение результатов.

Приведенные результаты получены с использованием банка данных Коллаборации АНИ. Ответственность за обработку данных и выводы несет авторский коллектив.

Работа выполнена при поддержке проекта МНТЦ А116.

### Список литературы

- [1] Nagano M., et al., G:Nucl. Phys., 1984, 10, 27.
- [2] Данилова Е.В. и др., Изв. РАН сер. Физ., 1994, 58, 67.
- [3] Amenomori M., et al., Astrophys. Journal, 1996, 461, 408.  
Aglietta M. et al., Astropart. Phys., 1999, 10, 1.
- [4] Glasstetter R., et al., Proc. 66th ECRS (Alcala, 1998), 564
- [5] Авакян В.В. и др., Ядерная Физика, 1993, 56, 182.
- [6] Кабанова Н.В., Ромахин В.А., Препринт ФИАН, 1990, 65.  
Gharagozyan G.V. et al. ANI Collaboration Scient. rep. 2000, 1.
- [7] Gharagozyan G.V. et al. Proc. ANI98, FZKA 6215, (Nor-Amberd, 1998) 51.
- [8] Sokhoyan S.H. et al., Proc. ANI98, FZKA 6215, (Nor-Amberd, 1998) 55.
- [9] Chilingarian A. et al., Proc. 26th ICRC (Salt Lake City, 1999), HE 2.2.04
- [10] Heck D. et al., Forschungszentrum, Karlsruhe, Report FZK, 1998, 6019.  
Kalmikov N. et al. Nucl. Phys. B, 1997, 52B, 17
- [11] Liland A. Proc. 26th ICRC (Salt Lake City, 1999), HE 1.3.19

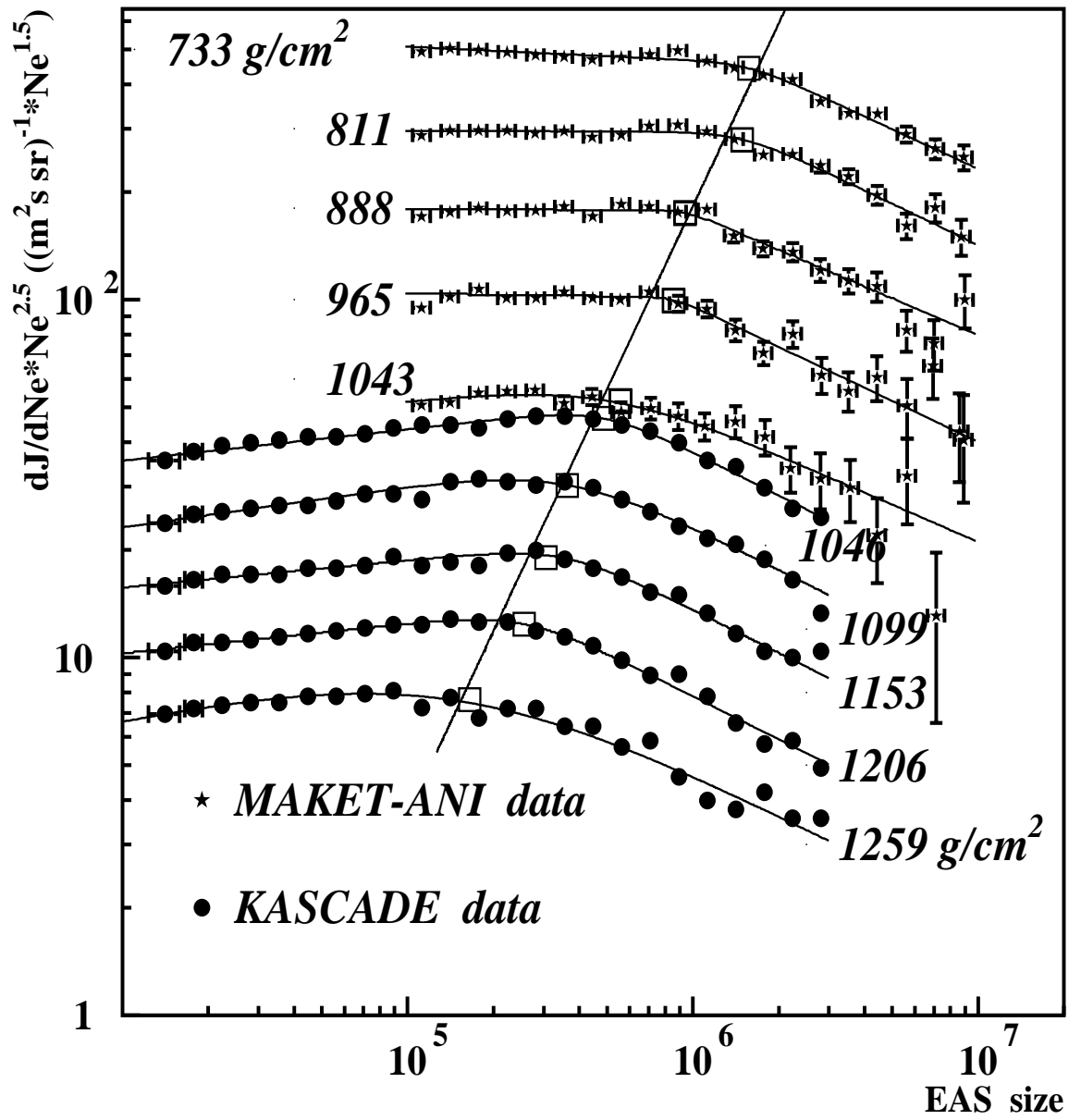


Рис. 1: Дифференциальный спектр ШАЛ по  $N_e$  для разных приведенных глубин.

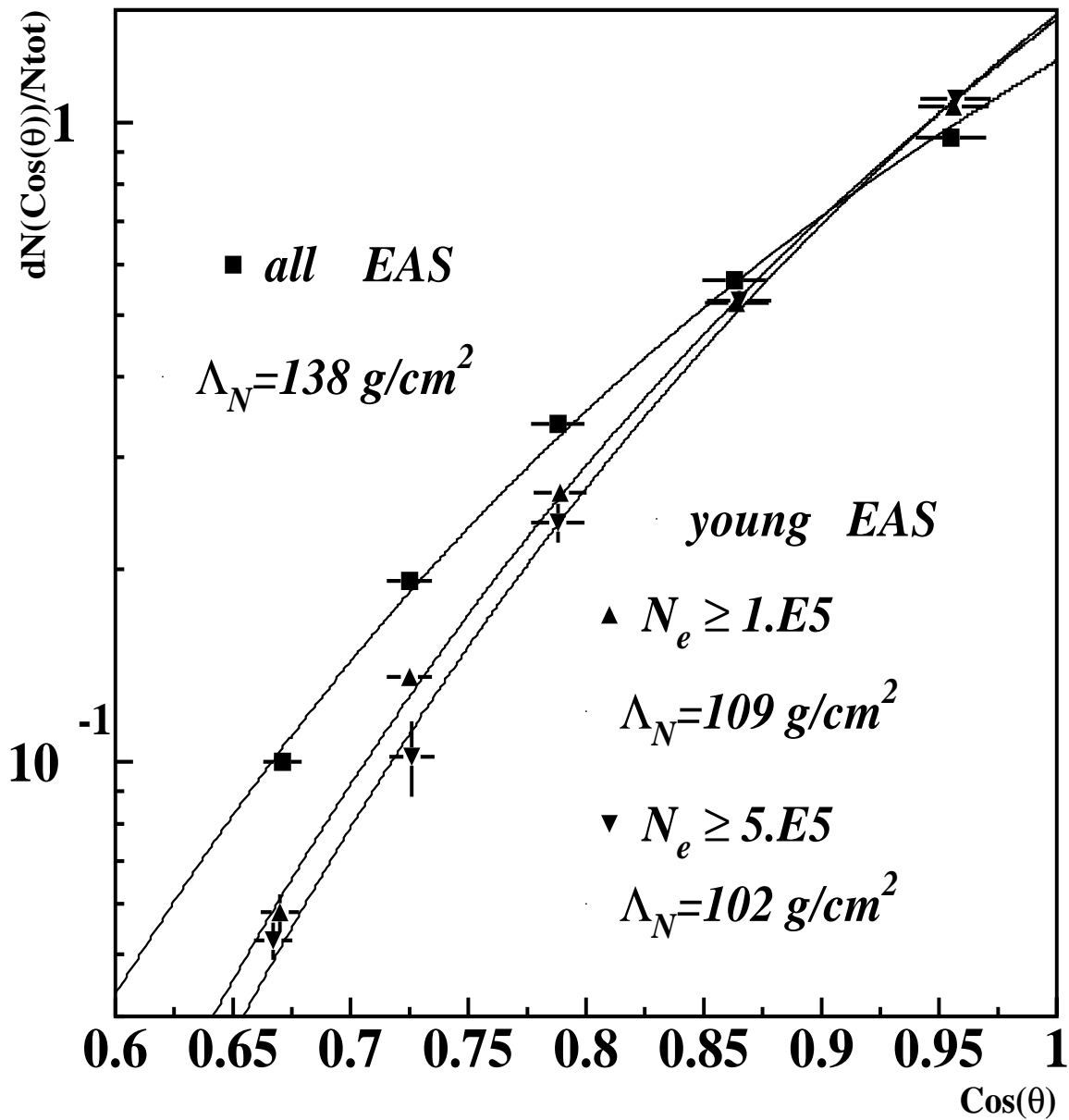


Рис. 2: Угловое распределение ШАЛ, селективированных как «молодые» в сравнении со всеми ШАЛ. (линии соответствуют экспоненциальной функции поглощения с указанными на рис. значениями  $\Lambda_N$ )