

Функция пространственного распределения электронов ШАЛ в области $10^5 \leq N_e \leq 3 \times 10^7$ по данным установки Макет-АНИ.

С. Блохин¹, Н. Кабанова¹, С. Казарян², Г. Карагезян², Э. Мамиджян^{1,2},
Л. Мелкумян², С. Никольский¹, Г. Овсепян², В. Ромахин¹, С. Сохоян²,
А. Чилингарян²

¹ Физический институт имени П.Н. Лебедева, Ленинский пр.53, 117924, Москва, РФ

² Отделение Физики Космических Лучей, Ереванский Физический Институт, Ереван 375036, РА

Функция пространственного распределения (ФПР) электронов при $N_e \geq 10^5$ измерена на установке, расположенной на высоте 3200м от уровня моря на высокогорной станции Арагац (Армения). Плотности ливневых частиц определены до расстояний ≤ 120 м от оси ливня. Экспериментально наблюдаемые плотности описываются функцией Нишимуры-Каматы-Грейзена. Наблюдаемые ФПР сравниваются с результатом моделированной по CORSIKA 562(QGSJET,NKG).

1 Введение.

Установка Макет-АНИ [1]-[2] предназначена для регистрации и исследования ШАЛ с числом частиц $N_e \geq 10^5$, что соответствует первичным энергиям $\sim 10^{14}$ эВ. Основная цель установки исследование характеристик ливней в области "излома" ($E_o \sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ).

Детекторы электронно-фотонной компоненты ШАЛ, изготовлены из пластических сцинтилляторов толщиной 5 см. Часть детекторов с площадью 0.09 м^2 ("малые") предназначены для регистрации высоких плотностей ливневых частиц вблизи оси ливня. Остальные детекторы, как центральные, так и периферийные имеют площади сцинтилляторов 1 м^2 . Всего задействовано 92 детектора. Реально обеспеченный динамический диапазон каналов измерения числа частиц (сцинтиллятор, кожух, ФЭУ, АЦП) равен $\simeq 5 \cdot 10^3$. Система регистрации и контроля информации, выполнена в стандарте КАМАК.

Угловые координаты оси ШАЛ определяются системой "временных" детекторов. На 19 детекторах смонтирован дополнительный ФЭУ, который предназначен для измерения времени прихода частиц ШАЛ. Для зенитных углов $\theta \leq 45^\circ$, угловое разрешение установки оценено не хуже 1.6° по зенитному и 6° по азимутальному углам, соответственно [3].

Характеристики детекторов, используемых на установке подробно описаны в работах [1],[4]. Для перехода от измеряемой амплитуды ФЭУ к числу ливневых частиц, для каждого детектора используется информация от специального контрольного модуля. Мода K_m распределения по кодам АЦП фоновых частиц для каждого детектора используется как калибровочное измерение $K_o = \delta \cdot K_m$, где K_o - код АЦП, соответствующий среднему энерговыделению от ливневого электрона, при вертикальном прохождении через детектор, а δ - коэффициент пропорциональности. В [5] показано, что $\delta \simeq 1$.

2 Алгоритм обработки экспериментальных данных.

Восстановление параметров ШАЛ по экспериментально измеренным показаниям детекторов проводится с помощью аппроксимационной функции, описывающей электромагнитную компоненту ливня. Для восстановления параметров ШАЛ по данным установки МАКЕТ-АНИ используется аппроксимационная функция Нишимуры-Каматы-Грейзена (НКГ) [6]:

$$\rho(r) = \frac{N_e}{2\pi R_m^2} C(s) \left(\frac{r}{R_m}\right)^{s-2} \left(\frac{r}{R_m} + 1\right)^{s-4.5}, \quad (1)$$

где $\rho(r)$ - плотность ливневых частиц на расстоянии r от оси ливня, N_e - число частиц в ШАЛ, $R_m = 118\text{м}$ - радиус Мольера для уровня установки Макет-АНИ, s - параметр возраста ливня, и $C(s) = 0.366s^2(2.07 - s)^{1.25}$ - нормировочный член [7],[8].

Восстановление параметров ШАЛ проводится в логарифмическом масштабе измеренных плотностей. Мощность ливня N_e оценивается по восстановленным s , (X_o, Y_o) и экспериментально измеренным плотностям ρ_i [2].

На установке Макет-АНИ переходные процессы исследованы экспериментально [9] и пересчет от "сцинтилляционных" плотностей к "электронным" проводится согласно следующей формуле:

$$\rho_{scin}(r)/\rho(r) = a \cdot (r/R_m)^\alpha, \quad (2)$$

где $a = 1$, $\alpha = -0.18$ [2],[9].

3 Функция Пространственного Распределения ливневых электронов.

Исследование Функции Пространственного Распределения (ФПР) ливневых электронов в ШАЛ важно, как для точного определения размера ливня N_e , так и параметра возраста s , определяющего наклон ФПР мягкой компоненты ШАЛ.

Корреляция этих двух параметров представляет интерес с точки зрения понимания механизма взаимодействия частиц первичного космического излучения(ПКИ) с ядрами атомов воздуха, а также массового состава ПКИ.

Для установки Макет-АНИ максимально наблюдаемые расстояния от оси ливня при эффективности регистрации $\epsilon \geq 95\%$ составляют $R \sim 125\text{м}$, что практически совпадает с радиусом Мольера для уровня г. Арагац.

За время экспозиции $1.06 \cdot 10^8$ сек установкой зарегистрировано $9.5 \cdot 10^6$ триггеров ШАЛ. Для построения ФПР ливневых электронов отбирались события, удовлетворившие следующим условиям: а) мощность ШАЛ $N_e \geq 1 \cdot 10^5$; б) параметр возраста $0.3 \leq s \leq 1.7$; в) зенитный угол $\theta \leq 46.8^\circ$; г) координаты оси ливня находятся в пределах максимально допустимой эффективной площади регистрации S_{eff} при котором $\epsilon \geq 95\%$. д) ошибки восстановления координат оси ливня - не более 2.5м. Указанным условиям удовлетворило $\sim 1 \cdot 10^6$ ливней.

Отклонения экспериментально наблюдаемых электронных плотностей $\rho(R)$ ливневых частиц от аппроксимационной функции (1) исследованы для семи логарифмически равномерных интервалов по N_e с шагом 0.3, посредством построения относительных отклонений экспериментально наблюдаемых плотностей $\rho(r)$ и ρ_{NKG} - ожидаемых по НКГ аппроксимации с восстановленными N_e и s . Аппроксимационная функция (1) с точностью

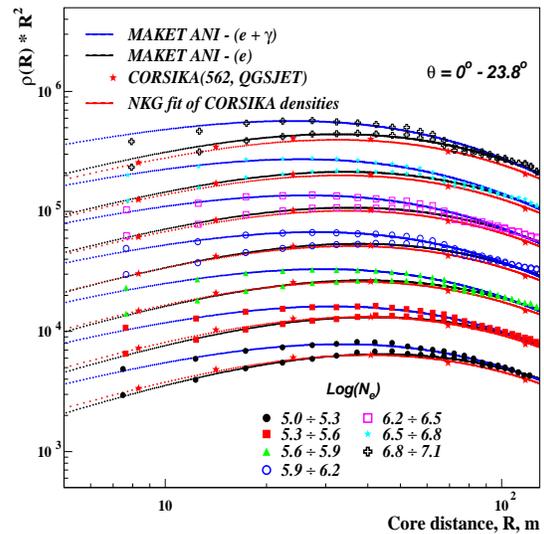


Figure 1: Экспериментально наблюдаемые ФПР ливневых частиц в сравнении с моделированием по CORSIKA 562 (QGSJET,NKG)

не хуже $\pm 5\%$ описывает экспериментально

наблюдаемые ФПР ливневых электронов до расстояний $\leq 120\text{м}$ от оси ливня. На Рис. 1 приведены в сравнении ФПР для экспериментальных и моделированных по CORSIKA 562 (QGSJET,NKG) [10],[11] событий. Для пяти первичных ядер H, He, O, Si, Fe смоделировано по 10^6 событий с энергиями $E_0 \geq 10^{14}$ эВ. Глубина наблюдения - 700г/см^2 . Наклон спектра не зависит от типа первичного ядра и равен $\gamma_1 = 2.7$ и $\gamma_2 = 3.1$ до и после излома, соответственно. Излом моделировался в соответствии $E_{knee} = Z \cdot E^p, E^p = 3 \cdot 10^{15}$ эВ [12]. Массовый состав ПКИ соответствует "нормальному" [12]. С учетом функции отклика установки проверялись триггерные условия для смоделированных событий и после проверки эффективности регистрации, аналогично экспериментальным данным, событие записывалось в банк данных для анализа. Приведенные ФПР построены для "вертикальных" ШАЛ ($\theta \leq 23.8^\circ$) в семи интервалах N_e с равномерным шагом 0.3 в логарифмической шкале.

Экспериментальные данные представлены в двух вариантах: а) ФПР, непосредственно измеренные сцинтилляционными детекторами; ($e + \gamma$); б) ФПР, откорректированные на вклад γ -квантов (e) по (2).

Согласие экспериментальных ФПР для электронов в составе ШАЛ с моделированными указывает на корректный учет переходных процессов в сцинтилляционных детекторах. Наблюдаемая на установке Макет-АНИ ФПР ливневых частиц сравнивается с НКГ функцией, построенной по $s(N_e)$ зависимостям из [13],[14].

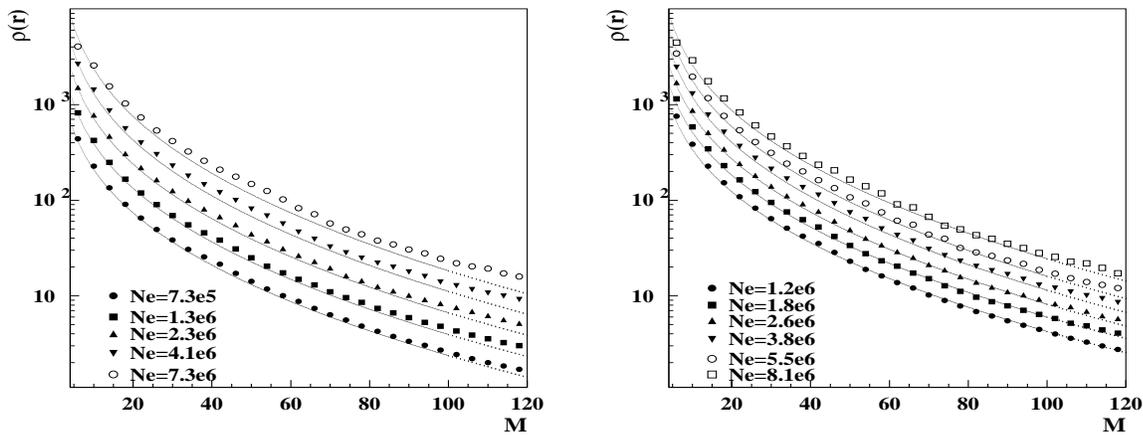


Figure 2: Наблюдаемый ФПР в сравнении с НКГ аппроксимацией по N_e и s . взятых из [13](левый) и [14](правый). Точки на рисунке - эксперимент.

На Рис. 2 представлены наблюдаемые ФПР в сравнении с НКГ аппроксимациями по данным установок Тянь-Шань [13](690 г/см^2) и NORIKURA [14](735 г/см^2). Для сравнения интервалы по N_e были выбраны так, чтобы средние значения совпадали с приводимыми в работах. На расстояниях порядка R_m , для наиболее мощных ШАЛ ($N_e \sim 10^7$), доступных нам для исследований, отклонения составляют $\sim 20\%$ в случае с [13] и $\sim 5\%$ для [14]. В пределах ошибок (при $N_e \sim 10^7$ $\sigma_{\rho(r \sim 100m)} \simeq 20\%$), измеренные нами ФПР, достаточно аккуратно согласуются с [13] и [14].

4 Выводы.

За время экспозиции 1997 - 2002 гг. зарегистрировано $9 \cdot 10^6$ триггеров ШАЛ с $N_e \geq 5 \cdot 10^4$. Полезная статистика составляет $\sim 10^6$ событий.

Экспериментально полученные калибровочные соотношения: - переход от зарегистрированных амплитуд ФЭУ к "эквивалентным ливневым частицам" и учет переходных процессов в сцинтилляционных

детекторах проверены с помощью моделирования на основе пакета программ CORSIKA [10],[11]. Наблюдается хорошее согласие эксперимента с расчетом.

Исследованы экспериментальные и моделированные функции пространственного распределения электронов в ШАЛ в области $10^5 \leq N_e \leq 3 \times 10^7$.

Функция Нишимуры-Каматы-Грейзена описывает экспериментально наблюдаемое пространственное распределение ливневых частиц с точностью не хуже $\pm 5\%$ с единым параметром возраста, вплоть до расстояний 120м от оси ливня.

Наблюдаемые на установке Макет-АНИ ФПР ливневых электронов в пределах ошибок измерений хорошо согласуются с данными других установок, расположенных на высотах гор.

5 Благодарность

Авторы благодарны коллегам за обсуждения и замечания при подготовке доклада, а также персоналу в/с Арагац, без труда которых было бы невозможным выполнение данной работы. Работа выполнена по грантам правительства РА, а также по грантам А216 МНТЦ и IA-2000-01 INTAS.

References

- [1] Е.В.Базаров и др., ВАНИТ сер. Тех. Физ. Экспер., в.5(31),1986, с.3-16
- [2] В.В. Авакян и др., ЯФ, т.55 (1993) с.174
- [3] А.А. Chilingarian, G.V. Gharagozyan, H.S. Martirosyan Proc. 27th ICRC, (Hamburg, 2001) , v. 2 p. 590.
- [4] А.Дарьян и др. Препринт ЕрФИ, 1485(2)-976 2002
G.G. Novsepyan for the ANI collab., Proc. of the Workshop ANI 98, eds. A.A. Chilingarian, H.Rebel, M. Roth, M.Z. Zazyan, FZKA 6215, Forschungszentrum Karlsruhe 1998, p.41
- [5] В.А.Ромахин, Письма в ЖЕТФ, 1985
- [6] K.Greisen, Progress in Cosmic Ray Physics 3, North Holland Publ. (1956)
K.Kamata, J.Nishimura, Progr. Theoret. Phys., Supp. 6 (1958) 93 Nishimura J., Handbuch der Physik, Bd. XLVI/2,Berlin,1967,S.1. Astronomy, V. 22, Wiley-Interscience, 1969
- [7] Hayakawa S., Cosmic Ray Physics, Interscience Monographs and Texts in Physics and Astronomy, V. 22,Wiley-Interscience, 1969.
- [8] В.С. Асейкин и др., Труды ФИАН, т.109, (1979) с.3
- [9] Blokhin S.V., Romakhin V.A., Novsepyan G.G., Proc. Workshop ANI 99, (Nor-Amberd, 1999).
- [10] Heck D. et al. FZKA report 6019, Forschungszentrum, Karlsruhe, 1998
- [11] Kalmikov N., Ostapchenko S. Pavlov A. Nucl.Phis.B.(Proc.Suppl.), 52B,1997,17
- [12] Г.Б. Христиансен и др., Космические лучи сверхвысоких энергий, Атомиздат,1975
Khristiansen G.B. et al. Astroparticle Physics,2(1994) 127-136.
- [13] Д.С. Адамом, Автореф.Дисс.Кан.ф-м н., Москва, 1990
Antonov R.A. et al. 24th ICRC, Rome, v.2, (1995), 776
- [14] Miyake et al. 16th ICRC, Kyoto, 1979, v.13, 171