

ФУНКЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ШАЛ В ОБЛАСТИ $10^6 \leq N_e \leq 3 \times 10^7$ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ Макет-АНИ

© 2005 г. - С. Блохин¹, Н. Кабанова¹, С. Казарян², Г. Карагезин¹,
Э. Мамиджян^{1,2}, Л. Мелкумян², С. Никольский¹, Г. Овсепян¹, В. Ромахов¹,
С. Соколов¹, А. Чиливарян²

Функция пространственного распределения (ФПР) электронов при $N_e \geq 10^6$ измерена на установке, расположенной на высоте 3200 м от уровня моря на высокогорной станции Арагац (Армения). Плотности ливневых частиц определены до расстояий ≤ 120 м от оси ливня. Экспериментально наблюдаемые плотности описываются функцией Нишануры – Каматы – Грейзера. Наблюдаемые ФПР сравниваются с результатом моделирования по CORSIKA 5621QGSJET, NKG.

ВВЕДЕНИЕ

Установка Макет-АНИ [1, 2] предназначена для регистрации и исследования ШАЛ с числом частиц $N_e \geq 10^6$, что соответствует первичным энергиям $\sim 10^{14}$ эВ. Основная цель установки – исследование характеристик ливней в области “педла” ($E_0 = 3 \cdot 10^{13}$ эВ). Детекторы электронно-фотонной компоненты ШАЛ, изготовлены из пластмассовых сцинтилляторов толщиной 5 см. Часть детекторов с площадью 0.09 м² (“малые”) предназначена для регистрации высоких плотностей ливневых частиц вблизи оси ливня. Остальные детекторы, как центральные, так и периферийные, имеют площади сцинтилляторов 1 м². Всего задействовано 92 детектора. Реально обеспеченный динамический диапазон каналов измерения числа частиц (сцинтиллятор, ФЭУ, АЦП) равен $\sim 5 \cdot 10^5$. Угловые координаты оси ШАЛ определяются системой временных детекторов. Для азимутных углов $\theta \leq 45^\circ$, угловое разрешение установки оценено не хуже 1.5° по зенитному и 5° по азимутальному углам соответственно [3].

Характеристики детекторов, используемых на установке, подробно описаны в [1, 4]. Для перехода от измеренной 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 $K_0 = \delta K_m$, где K_0 – код АЦП, соответствующий среднему энергоделиению от ливневого электрона при вертикальном проходе через детектор, а δ – коэффициент пропорциональности. В [5] показано, что $\delta = 1$.

1. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для восстановления параметров ШАЛ по данным установки Макет-АНИ используется аппроксимационная функция Нишануры – Каматы – Грейзера (НКГ) [6]:

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

где $\rho(r)$ – плотность ливневых частиц на расстоянии r от оси ливня, N_e – число частиц в ШАЛ, $R_m = 118$ м – радиус Мольера для уровня установки Макет-АНИ, x – параметр возраста ливня, и $C(x) = 0.366x^2(2.07 - x)^{-2.5}$ – нормировочный множитель [7, 8]. Восстановление параметров ШАЛ проводится в логарифмическом масштабе измеренных плотностей. Мощность ливня N_e оценивается по восстановленным x , (X_0 , Y_0) и экспериментально измеренным плотностям ρ (см. подробно в [2]).

На установке Макет-АНИ зеркальные процессы исследованы экспериментально [9], и переход от “сцинтилляционных” плотностей к “электронным” проводится согласно следующей формуле:

$$\rho_{\text{элект}}(r)/\rho(r) = a(e/R_m)^a, \quad (2)$$

где $a = 1$, $\alpha = -0.18[2, 9]$.

2. 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 для параметра возраста x , определяющего вид ФПР мягкой компоненты ШАЛ. Корреляция этих двух параметров представляет

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева, Российской академии наук, Москва.

² Ереванский физический институт, Ереван.

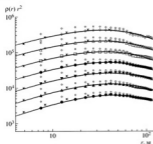


Рис. 1. Экспериментально наблюдаемые ФПр ливневых частиц для вертикальных ШАЛ в сравнении с моделированием по программе CORSIKA 562 (QGSJET, NKG). Эксперимент: \times – с учетом вылета γ -квантов по (2), без учета – \circ . Линии на рисунке – НКГ-аппроксимация экспериментальных данных. Число частиц в ливне N_0 : \bullet – $1.35 \cdot 10^6$, \blacktriangle – $2.71 \cdot 10^6$, \blacktriangledown – $5.47 \cdot 10^6$, \bullet – $1.08 \cdot 10^7$, \square – $2.15 \cdot 10^7$, \triangle – $4.23 \cdot 10^7$, \circ – $8.31 \cdot 10^7$.

интерес с точки зрения понимания механизма взаимодействия частиц первичного космического излучения (ПКИ) с ядрами атомов воздуха, а также массового состава ПКИ. За время экспозиции 1.06×10^6 сек установкой зарегистрировано 9.5×10^6 ШАЛ. Для построения ФПр ливневых электронов отбирались события, удовлетворявшие следующим условиям: а) мощность ШАЛ $N_0 \geq 10^6$; б) параметр возраста $0.3 \leq s \leq 1.7$; в) зенитный угол $\theta \leq 46.8^\circ$; г) координаты оси ливня находились в пределах максимально допустимой эффективной площади регистрации $S_{\text{эф}}$, при которой эффективность регистрации события $\epsilon \geq 0.95$; д) ошибки восстановления координат оси ливня не более 2.5 м. Указанным условиям удовлетворяют $\sim 10^6$ ливней.

Отклонения экспериментально наблюдаемых электронных плотностей $\rho(r)$ ливневых частиц от аппроксимационной функции (1) исследованы для семи логарифмически равномерных интервалов по N_0 с шагом 0.3 посредством построения относительных отклонений экспериментально наблюдаемых плотностей $\rho(r)$ от $\rho_{\text{НКГ}}$, получаемых по НКГ-аппроксимации с восстановленными N_0 и s . Аппроксимационная функция (1) с погрешностью не хуже $\pm 5\%$ описывает экспериментально наблюдаемые ФПр ливневых электронов до расстояний ≤ 120 м от оси ливня. Сравнение эксперимен-

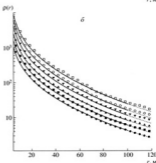
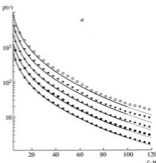


Рис. 2: а – наблюдаемые ФПр в сравнении с НКГ-аппроксимацией (линии), взяты из [13]. Точки на рисунке – эксперимент. Значения N_0 : \bullet – $7.3 \cdot 10^6$, \blacktriangle – $1.3 \cdot 10^7$, \blacktriangle – $2.5 \cdot 10^7$, \blacktriangledown – $4.1 \cdot 10^7$, \circ – $7.3 \cdot 10^7$. б – то же, но данные из [14]. Значения N_0 : \bullet – $1.2 \cdot 10^6$, \blacktriangle – $1.8 \cdot 10^6$, \blacktriangle – $2.6 \cdot 10^6$, \blacktriangledown – $3.8 \cdot 10^6$, \circ – $5.5 \cdot 10^6$, \square – $8.1 \cdot 10^6$.

тальных ФПр с расчетным проведено с использованием программы CORSIKA 562 (QGSJET, NKG) [10, 11]. Для пяти первичных ядер H, He, O, Si, Fe смоделировано по 10^6 событий с энергией $E_0 \geq \geq 10^{14}$ эВ. Глубина наблюдения 700 г 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 $E_{\text{lim}} = ZEF$, $E = 3 \cdot 10^{15}$ эВ, Z – заряд первичного ядра [12]. Массовый состав ПККИ соответствует нормальному [12]. С учетом функции отклика установка при выполнении триггерных условий событие записывалось в банк данных для анализа аналогично экспериментальным данным. На рис. 1 приведены моделируемые ФПР в сравнении с экспериментально наблюдаемыми. Приведенные ФПР построены для “околовертикальных” ШАЛ ($\theta \leq 23.8^\circ$) в семи интервалах N_p с равномерным шагом 0.3 в логарифмической шкале, начиная с $\lg N_p = 5$. Средние значения N_p в интервалах приведены в подписи к рисунку. Экспериментальные данные представлены в двух вариантах: а) ФПР, непосредственно измеренные сцинтилляционными детекторами ρ_{sc} (на рис. 1 – \square); б) ФПР, откорректированные на вклад γ -квантов согласно формуле (2). Хорошее согласие экспериментальных ФПР, откорректированных на вклад γ -квантов, с моделируемыми, как видно из рис. 1, указывает на корректный учет в эксперименте переходных процессов в сцинтилляционных детекторах. Сцинтилляционные плотности ρ_{sc} достаточно сильно отличаются от моделируемых.

В публикациях по ФПР, как правило, табличные данные отсутствуют: приводятся либо рисунки, либо зависимости $\ln(N_p)$, поэтому сравнение наблюдаемых на установке Макет-АНИ ФПР ливневых частиц с аналогичными данными установок, расположенными на высотах гор Тинь-Шань ($690 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$) [13] и NORIKURA ($735 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$) [14] проведено посредством описания экспериментально полученных ФПР НКГ-функциями, построенными по оценкам параметра возраста z и N_p , опубликованных в указанных работах. Для корректности сравнения экспериментальные ФПР Макет-АНИ были построены для тех же азимутных углов ($\theta \leq 30^\circ$) и интервалов по N_p , что приведены в указанных работах. На рис. 2 представлены наблюдаемые ФПР (точки) в сравнении с НКГ-аппроксимациями по данным установок Тинь-Шань [13] и NORIKURA [14] (линии). Из рис. 2а видно, что при малых N_p (до $2 \cdot 10^6$) измеренные ФПР достаточно accurately описываются НКГ-функцией с параметрами z и N_p , полученными на Тинь-Шаньской установке. Для более же мощных ШАЛ ($N_p = 10^7$) отклонения от НКГ-аппроксимации растут и на расстояниях порядка 100 м составляют ~20–25%. В то же время это различие

находится в пределах стандартного отклонения измеренных плотностей, определяемых ошибками измерений и пуассоновскими флуктуациями частиц в ШАЛ. Наблюдаемые нами ФПР также хорошо описываются (не хуже –5–10%) НКГ-аппроксимацией ливневых частиц с параметрами z и N_p , полученными в эксперименте NORIKURA [14] (рис. 2б) для всех интервалов по N_p .

Согласие экспериментальных ФПР с моделированием указывает на корректность экспериментально полученных калибровочных коэффициентов. Наблюдаемые на установке Макет-АНИ ФПР в пределах ошибок измерений согласуются с данными установок, расположенными на высотах гор.

Авторы благодарны коллегам за обсуждения и замечания при подготовке работы, а также персоналу ИС Арганд, без труда которых было бы невозможно выполнение данной работы. Работа выполнена при поддержке грантов правительства РА, а также грантов А1058 МНТЦ и IA-2000-01 INTAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базаров Е.В. и др. // ВАНТ сер. Тех. Физ. Экспер. 1986. Вып. 5 (31). С. 3.
2. Авакян В.В. и др. // ЯФ. 1993. Т. 55. С. 174.
3. Chilingarian A.A., Ghasghasian G.V., Martirosyan H.S. // Proc. 27th ICRC. Hamburg. 2001. V. 2. P. 590.
4. Дарьян А. и др. Препринт ЕрФИ. 1485(2)-9762002; Hovsepian G.G. // Proc. Workshop ANI 98. FZKA 6215; Forschungszentrum Karlsruhe. 1998. P. 41.
5. Ромашин В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1985.
6. Greisen K. // Progress in Cosmic Ray Physics, V. 3, North-Holland Publ., 1956; Kamata K., Nishimura J. // Progr. Theor. Phys. Suppl. 1958. V. 6. P. 93.
7. Hayakawa S. // Cosmic Ray Physics. Interscience Monographs and Texts in Physics and Astronomy, V. 22. Wiley Int., 1969.
8. Аселян В.С. и др. // Тр. ФИАН. 1979. Т. 109. С. 3.
9. Blakie S.V., Romashin V.A., Hovsepian G.G. // Proc. Workshop ANI 99. Nor-Amberd, 1999.
10. Heck D. et al. // FZKA report 6019, Forschungszentrum, Karlsruhe, 1998.
11. Kalmykov N., Ostapchenko S., Pavlov A. // Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.). 1997. V. 52. P. 17.
12. Христиансен Г.В. и др. Космические лучи сверхвысоких энергий. М.: Атомиздат, 1973; Christoffersen G.B. et al. // Astropart. Phys. 1994. V. 2. P. 127–136.
13. Авакян Д.С. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, ФИАН. М.: Атомиздат, et al. // Proc. 24th ICRC. Rome. 1995. V. 2. P. 776.
14. Miyake et al. // Proc. 16th ICRC. Kyoto. 1979. V. 13. P. 171.