

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ  $10^{15}$  -  $10^{16}$  ЭВ В РАМКАХ ПРОБЛЕМЫ РЕШЕНИЯ  
ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

С. И. Никольский, В. П. Павлюченко, Й. Н. Стаменов

УДК 537.591.15

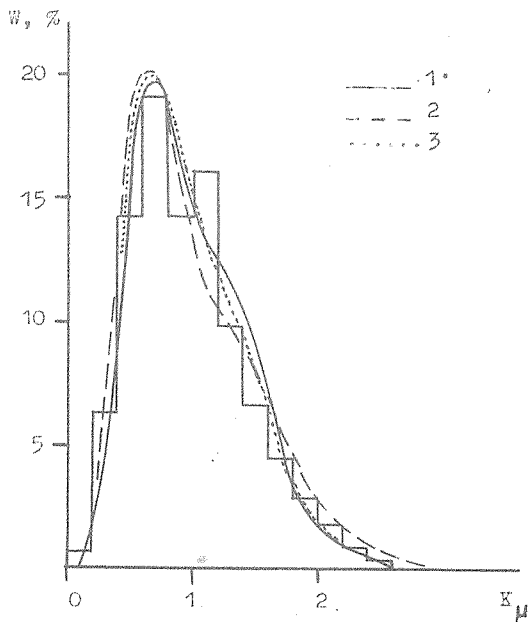
Проведен анализ флуктуационных распределений потоков мюонов и электронов в широких атмосферных ливнях методом решения обратной задачи и получена информация о ядерном составе первичного космического излучения в интервале энергий  $10^{15}$  -  $10^{16}$  эВ.

Анализ феноменологических характеристик широких атмосферных ливней (ШАЛ) дает пока единственную возможность получить информацию о ядерном составе первичного космического излучения с энергией выше  $10^{15}$  эВ, так как область применения соответствующих прямых методов все еще ограничивается энергиями  $10^{13}$  эВ.

В наших работах /1,2/ ранее было показано, что анализируя форму распределения флуктуаций потока мюонов  $w(K_\mu)$  в ливне с данным числом электронов ( $N_e = \text{const}$ ) или флуктуаций потока электронов  $w(K_e)$  при  $N_\mu = \text{const}$  (здесь  $K_\mu$ ,  $K_e$  - относительный поток мюонов или электронов) можно получить количественные данные о доле пяти основных групп ядер в первичном космическом излучении с энергией  $10^{15}$  -  $10^{16}$  эВ /2/:  $A = 1$  (протоны) - (35 - 45)%;  $A = 4$  ( $\alpha$ -частицы) - (10 - 20)%;  $A = 14$  - (10 - 20)%;  $A = 31$  - (10 - 20)% и  $A = 51$  - (10 - 25)%. При анализе данных применялся метод подбора /3/, который оказался крайне трудоемким. Ниже проблема извлечения информации о первичном составе из тех же экспериментальных данных рассматривается как поиск решения обратной задачи

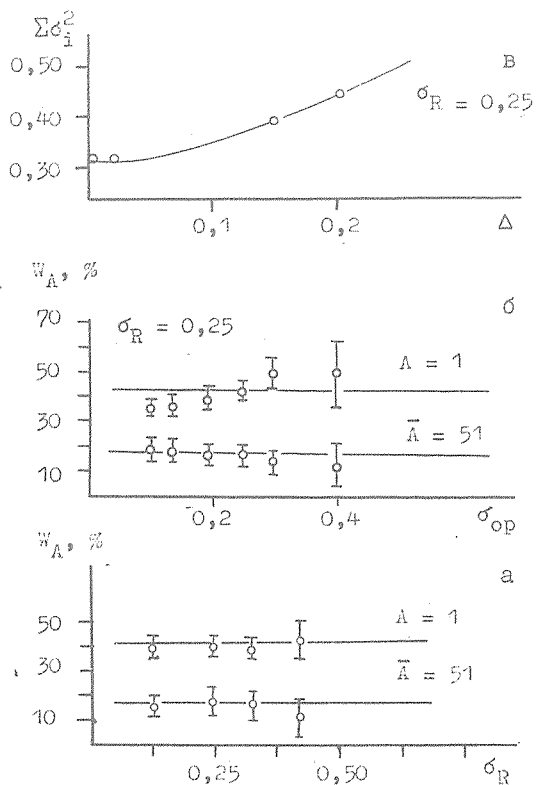
$$R_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} f_j$$

методом, описанным в /4/. В данном случае  $F_i$  ( $i = 1 \div 15$ ) — это экспериментально полученные флуктуационные распределения потока мюонов  $w(K_\mu)$  либо электронов  $w(K_e)$  в ливнях. Искомый первичный состав  $f_j$  предполагается состоящим из пяти основных компонент  $j = 1 \div 5$ . Матрица  $A_{i,j}$  размерностью  $5 \times 15$  описывает для каждого типа ядер ожидаемые в какой-либо принятой модели адронного взаимодействия физические флуктуационные распределения, искаженные "шумами" измерений и обработки экспериментальных данных  $R(\sigma_R)$ , характерными для данного эксперимента и определенным методом полного моделирования /5/.



Р и с. 1. Сравнение экспериментальной гистограммы (583 ливня) и рассчитанных по модели СКР распределений  $w(K_\mu)$ ,  $N_e = (1,0 - 1,8) \cdot 10^6$ : 1 — результат применения метода /4/ решения обратной задачи, 2,3 — результат применения метода подбора /3/.  
 2 —  $F_p = 0,46$ ;  $w_\alpha = 0,12$ ;  $w_{14} = 0,12$ ;  $w_{31} = 0,16$ ;  $w_{51} = 0,14$ ,  
 3 —  $F_p = 0,38$ ;  $w_\alpha = 0,19$ ;  $w_{14} = 0,15$ ;  $w_{31} = 0,16$ ;  $w_{51} = 0,14$ .

На рис. 1 приведено сравнение одного из экспериментально полученных распределений  $w(K_\mu)$ ,  $N_e = \text{const}$  с его аппроксимациями. Одна подобрана наилучшим образом (для двух составов) /2/, другая получена как отклик на решение обратной задачи.



Р и с. 2. Результаты исследования стабильности оценок  $w_A$  доли ядер разных групп в первичном излучении в зависимости от величины дисперсии распределения экспериментальных ошибок (а) величины флуктуаций в потоке мюонов, генерированных первичным протоном заданной энергии (б) и суммарной ошибки аппроксимации  $\sum \sigma_i^2$  от параметра  $\Delta$  принятой модели адронного взаимодействия (в)

Исследовано влияние величины относительной дисперсии  $\sigma_R$ , характеризующей шум измерения и обработки экспериментальных данных, на результат решения обратной задачи для относительных вкладов протонов и ядер группы железа ( $A = 51$ ). Из рис. 2а видно, что если вместо полученной нами в /5/ величины  $\sigma_R = 0,25$  использовать  $\sigma_R$  в интервале  $0,05 + 0,5$ , то относительные вклады протонов  $W_p$  и ядер группы железа  $W(A = 51)$  остаются постоянными с точностью до одной стандартной ошибки. Следовательно, применяемый метод не критичен к точности оценки искажений, вносимых установкой и алгоритмами обработки, но завышение искажений, естественно, ухудшает точность решения.

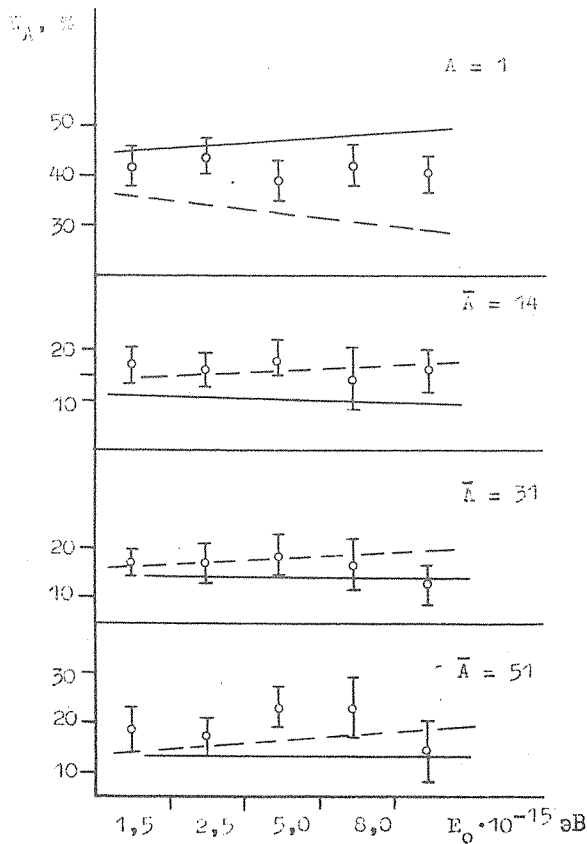
Проведен анализ влияния параметров модели адронного взаимодействия на форму распределений  $W(K_\mu)$  и  $W(K_e)$ . Рассматривались модели СКР /6/, высокой множественности /7/, скейлинга /8/ и модель с нарушением скейлинга во фрагментационной области и ростом эффективного сечения с увеличением энергии сталкивающихся адронов /9/.

Для рассматриваемого интервала энергий  $10^{15} - 10^{16}$  эВ и уровня наблюдения  $X_0 = 700 \text{ г/см}^2$  влияние модели на ожидаемые флуктуации в числе мюонов при заданном числе электронов и наоборот определяется в основном двумя параметрами. Разные модели элементарного акта предсказывают разную величину флуктуаций  $\sigma_{op}$  в относительном числе мюонов и электронов в ливне от первичного протона заданной энергии  $E_0$ , а также разные зависимости среднего числа мюонов в ливне от среднего числа электронов.

Основной причиной флуктуаций в развитии ливня являются флуктуации в высоте его зарождения. В частности, для модели СКР /6/ предсказывается  $\sigma_{op} = 0,20$ ; но, как видно из рис. 2б, изменения  $\sigma_{op}$  в пределах от 0,1 до 0,5 приводят к неразличимым (с точностью до одной стандартной ошибки) изменениям доли протонов и ядер железа в составе первичного космического излучения.

Соотношение между числом мюонов и электронов в ливне  $\bar{N}_\mu = \alpha N_e^\alpha$  зависит от предположений о процессах множественной генерации адронов. Однако при анализе флуктуаций относительных величин существен лишь параметр  $\alpha$ . В различных моделях развития ливня величина  $\alpha$  может изменяться в пределах 0,6 - 0,9. Однако экспериментально величина  $\alpha_{ex}$  известна с хорошей точ-

ностью в широком интервале величин  $N_{\mu}$ ,  $N_e$ . Согласие между расчетным значением  $\alpha$  и экспериментальным  $\alpha_{\text{ex}}$  служит одним из критериев справедливости использованных предположений о модели процесса множественной генерации. Как следует из рис. 2в, наш



Р и с. 3. Зависимость оценки доли  $W_A$  группы ядер в первичном космическом излучении от первичной энергии в интервале  $10^{15}$  -  $10^{16}$  эВ. Штриховые линии - ожидаемое изменение  $W_A$  согласно галактическим теориям происхождения космических лучей; сплошные - согласно гипотезе Хилласа /10/

анализ не зависит от выбора модели процесса множественной генерации в диапазоне  $\Delta = |\alpha - \alpha_{\text{ex}}| \leq 0,05$ , т.е. если модель не противоречит эксперименту по значению параметра  $\alpha$ . Для нашего анализа величина  $\alpha_{\text{ex}}$  определена с ошибкой 0,01. На самом деле при  $\Delta > 0,05$  начинает расти норма вектора ошибок решения обратной задачи (рис. 2в), что свидетельствует, при прочих равных условиях, об ухудшении согласия экспериментального распределения  $W(K_{\mu}), N_e = \text{const}$  с матрицей  $A_{ij}$ , зависящей от принятой модели. Следовательно, норма вектора ошибок решения может служить дополнительным независимым критерием согласия принятой модели адронного взаимодействия с экспериментом.

Решение обратной задачи по восстановлению первичного состава из анализа флуктуационных распределений потока мюонов  $W(K_{\mu})$  и потока электронов  $W(K_e)$  в ШАД по данным за 8700 часов измерений показало, что доли первичных компонент  $W_A$  не изменяются в границах одной стандартной ошибки при изменении энергии первичных частиц от  $10^{15}$  до  $10^{16}$  эВ (рис. 3). Наиболее вероятный ядерный состав первичного космического излучения при этих энергиях приведен в таблице.

Таблица

| $W_A$ \ A  | I               | 4                | I4              | 3I              | 5I              |
|------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $W_A(\mu)$ | $0,41 \pm 0,04$ | $0,085 \pm 0,07$ | $0,16 \pm 0,06$ | $0,17 \pm 0,06$ | $0,18 \pm 0,05$ |
| $W_A(e)$   | $0,40 \pm 0,06$ | $0,17 \pm 0,08$  | $0,10 \pm 0,08$ | $0,15 \pm 0,06$ | $0,18 \pm 0,06$ |

Примененный метод решения задачи восстановления ядерного состава первичного излучения дает возможность существенно сузить доверительные интервалы оценок  $W_A$  доли отдельных компонент, полученных в /2/, и на много ускорить их получение в сравнении со стандартным методом подбора /3/.

Поступила в редакцию  
25 марта 1981 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. S. I. Nikolsky, N. V. Kabanova, J. N. Stamenov et al., Proc. 16<sup>th</sup> ICCR, Kyoto, v. 8, 335, 1979.

2. S. I. Nikolsky, N. M. Nikolskaja, J. N. Stamenov et al., Proc. American-Bulgarian Seminar on cascade processes, p. 61, Sofia, 1980.
3. А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. "Методы решения некорректных задач", "Наука", Москва, 1979 г.
4. С. И. Никольский, В. П. Павлюченко, Краткие сообщения по физике ФИАН № 8, 56 (1981).
5. Н. М. Никольская, Й. Н. Стаменов, Краткие сообщения по физике ФИАН № 1, 25 (1976).
6. Л. Г. Дегенко, Известия АН СССР, сер. физ. 34, 1974 (1970).
7. L. Popova, J. Wdowczyk, Proc. 15<sup>th</sup> ICCR, Plovdiv, v. 8, 409, 1977.
8. T. Shibata, Proc. 15<sup>th</sup> ICCR, Plovdiv, v. 8, 358, 1977.
9. T. V. Danilova, A. D. Erlykin, S. K. Machavariani, Proc. 17<sup>th</sup> ICCR, Paris, EA 3. 1-2, 1981.
10. A. M. Hillas, Proc. 16<sup>th</sup> ICCR, Kyoto, v. 8, 7, 1979.