

## О ПРИМЕНЕНИИ МОДЕЛИ СУПЕРПОЗИЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ МЮОННЫХ ГРУПП, ГЕНЕРИРОВАННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМИ ЯДРАМИ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

*С.Н.Бозиев, А.В.Воеводский, А.Е.Чудаков*

Методом Монте-Карло анализируются мюонные группы, генерированные ядрами первичных космических лучей. Из сравнения характеристик ливней, генерированных ядрами и протонами делается вывод о справедливости модели суперпозиции (МС). Расчеты проделаны для  $E_{\mu} = 0,2$  ТэВ, что соответствует минимальной пороговой энергии регистрации мюонов на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе.

В настоящее время существует ряд методов исследования химического состава первичных космических лучей высоких энергий, основанных на анализе данных как по мюонной компоненте широких атмосферных ливней (ШАЛ), так и на ее совместном анализе с другими компонентами ШАЛ. Большинство из них основаны на МС, впервые предложенной в <sup>1</sup>. Согласно этой модели ШАЛ от первичного ядра энергии  $E_A$  и атомного веса  $A$  будет эквивалентен сумме  $A$  ливней от первичных протонов с энергиями  $E_0 = E_A/A$ . В области энергий, доступных исследованию по данным ШАЛ, относительно МС возможны только теоретичес-

кие предсказания, основанные на определенных модельных представлениях. Так при моделировании ливней мы полагали, что  $\bar{N}_A$  нуклонов первичного ядра взаимодействуют в первом акте, а остальные  $A - \bar{N}_A$  нуклонов начиная с высоты первого акта взаимодействуют как свободные нуклоны. Очевидно, такая модель является приближенной, поскольку не учтены флуктуации  $\bar{N}_A$ , а также образование вторичных ядер – фрагментов, но она позволяет учесть основной фактор, характерный для ливней, генерированных ядрами, а именно, зависимость высоты первого взаимодействия от величины  $A$ .

Все характеристики элементарного акта учитывались согласно модели кварк-глюонных струн (МКГС) <sup>3-5</sup>. Данные по этой модели для взаимодействия  $pp$  и  $pA$  удовлетворительно описывают результаты экспериментов на ускорителях и в космических лучах. Обобщение МКГС для взаимодействия ядро-ядро проделано в недавней работе <sup>6</sup>.

Согласно результатам <sup>6</sup>, сечение неупругого взаимодействия первичного ядра  $A$  с ядром воздуха ( $\bar{A}_B = 14,7$ ) выбиралось в виде

$$\sigma_A(E_0) = 273 \sqrt{\bar{A}} (1 + 0,068 \ln E_0) \text{ мб.}$$

В предположении модели многократного рассеяния <sup>6,7</sup> среднее число взаимодействующих нуклонов налетающего ядра равно

$$\bar{N}_A = A \sigma_{NA_B}^{in} / \sigma_{AA_B}^{in} \quad (1)$$

Величина  $\bar{N}_A$  существенно зависит от  $A$  и слабо зависит от  $E_0$  в диапазоне  $E_0 = (10 - 10^3)$  ТэВ/нукл. Пренебрегая зависимостью от  $E_0$  в этом диапазоне имеем  $\bar{N}_{56} = 8$ ,  $\bar{N}_4 = 2$ . Следует также отметить, что в указанной области  $E_0$  инклюзивные спектры вторичных адронов, генерированных нуклонами первичных ядер с большой точностью совпадают с соответствующими спектрами для первичных протонов.

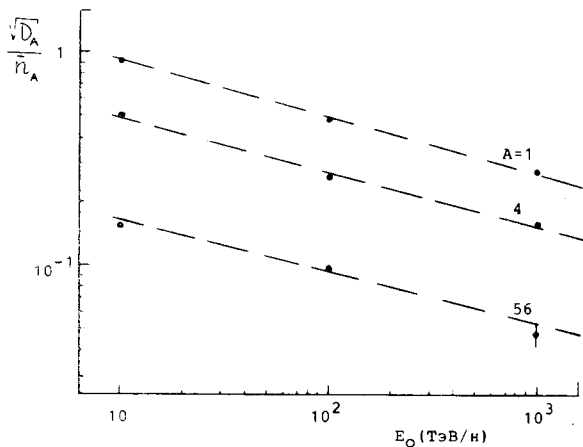


Рис. 1. Относительные флуктуации множественности мюонов с энергиями  $E_\mu \geq 0,2$  ТэВ в зависимости от атомного веса и энергии на нуклон

В экспериментах по исследованию мюонов ШАЛ, как правило, основными наблюдаемыми характеристиками являются число мюонов  $n_A$  и функция пространственного распределения (ФПР) этих мюонов. Если предположить независимость средних поперечных импульсов вторичных адронов от величины  $A$ , то ФПР мюонов, генерированных различными ядрами с одинаковыми энергиями на нуклон, совпадают в первом приближении, если совпадают средние высоты генерации мюонов  $\bar{h}_A$ . С этой точки зрения можно предположить, что

МС является правильной, если средний пробег одного нуклона первичного ядра равен среднему пробегу до взаимодействия первичного протона, т. е.

$$\bar{N}_A \lambda_A / A + (A - \bar{N}_A) (\lambda_A + \lambda_p) / A = \lambda_p.$$

Легко показать, что (1) является рашением этого уравнения относительно  $\bar{N}_A$  и поэтому следует ожидать, что МС выполняется с большой точностью для  $\bar{h}_A$  и  $\bar{n}_A$ .

Расчеты производились для первичных ядер с  $A = 1; 4; 56$  с учетом генерации мюонов через заряженные пионы и каоны. Подробное описание алгоритмов розыгрыша для первичных протонов проделано в работе <sup>8</sup>. В таблице приводятся отношения средних высот  $\bar{h}_A$  для ядер к средней высоте для первичных протонов  $\bar{h}_1$ . Приводятся также отношения среднего числа мюонов  $\bar{n}_A/A$ , генерированных одним нуклоном первичного ядра к величине  $\bar{n}_1$  для первичных протонов. Статистические погрешности величин, приведенных в таблице меньше, чем 1% (за исключением двух точек, где они указаны).

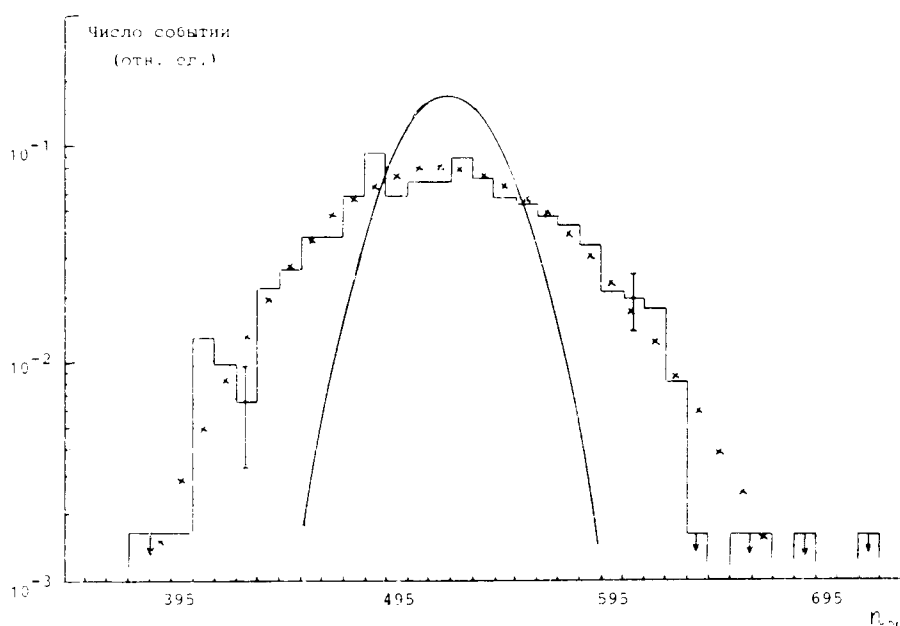


Рис. 2. Распределение по множественности мюонов с энергиями  $E_\mu \geq 0.2$  ТэВ, генерированных ядром железа с энергией 100 ТэВ/нукл: гистограмма - расчет, — — — распределение Пуассона, x - отрицательное биномиальное распределение

Несомненный интерес представляет вопрос о флуктуациях множественности мюонов в зависимости от величины  $A$ . На рис. 1 приводятся относительные флуктуации  $n_A$  для различных значений  $A$  в зависимости от  $E_0$ . В предположении справедливости МС для средней множественности и ее флуктуаций по закону Пуассона можно показать, что дисперсия для ядра  $A$  выражается через дисперсию для протона в виде  $D_A = AD_1$ . В таблице приведены величины дисперсий в зависимости от  $A$  и  $E_0$ , нормированные на величину  $AD_1$ . Видно, что с ростом  $A$  имеется существенное отклонение от предсказаний по МС, что, по-видимому, можно объяснить нелинейными эффектами, связанными как с возможностью группового подавления генерации мюонов в случае, когда тяжелое ядро проскакивает на большую глубину в атмосферу, так и генерацией большого числа мюонов при зарождении ШАЛ тяжелым ядром на больших высотах. На рис. 2 приводится распределение по числу мюонов событий,

генерированных ядром железа с энергией  $E_0 = 10^2$  ТэВ/нукл. Здесь делается сравнение расчетной гистограммы с распределением Пуассона. Видно, что результат розыгрыша не описывается распределением Пуассона и корректно описывается отрицательным биномиальным распределением (см. <sup>8, 9</sup>) с параметром  $k = 135,5$ .

$E_0$ , ТэВ/нукл	10	$10^2$	$10^3$
$\bar{h}_4 / \bar{h}_1$	1,00	0,99	1,00
$\bar{n}_4 / 4\bar{n}_1$	1,00	1,00	1,00
$\bar{h}_{56} / \bar{h}_1$	1,01	1,01	1,02
$\bar{n}_{56} / 56\bar{n}_1$	1,02	1,02	1,02
$D_A / 4D_1$	1,16	1,15	1,22
$D_{56} / 56D_1$	1,64	$2,26 \pm 0,07$	$1,69 \pm 0,17$

Таким образом мы получили, что для средних множественностей и средних высот генерации мюонов МС выполняется с большой точностью для  $\alpha$ -частиц и с погрешностью  $\delta < 3\%$  для ядра железа в диапазоне первичных энергий  $E_0 = (10 - 10^3)$  ТэВ/нукл. Для величины дисперсии распределения по  $n_A$  получено существенное отклонение от предсказаний по МС.

В заключение отметим, что для экспериментальной проверки МС необходимо знание характеристик первичного ядра, что возможно только в экспериментах на ускорителях. В настоящее время в ЦЕРН проводятся исследования взаимодействий  $^{16}\text{O}$  и  $^{32}\text{S}$  при  $E_0 = 0,2$  ТэВ/нукл с различными ядрами (см., напр. <sup>10, 11</sup>), в основном направленные на поиски кварк-глюонной плазмы. Взаимодействия ядро-ядро удовлетворяющие МС являются фоновыми в поисках кварк-глюонной плазмы и других экзотических явлений, связанных с коллективными взаимодействиями нуклонов взаимодействующих ядер. С этой точки зрения, а также для получения информации о химическом составе первичных космических лучей высоких энергий, МС представляет практический интерес и дальнейшее обоснование степени ее применимости представляется важной проблемой.

Авторы признательны Ю.М.Шабельскому за полезные обсуждения, а также Ю.М.Андрееву и О.В.Суворовой за помощь в расчетах на ЭВМ.

#### Литература

1. Горюнов Н.Н. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 1962, 5, 26.
2. Barbier L.M. et al. Phys. Rev. Lett. B, 1982, 117, 405.
3. Kaidalov A.B., Ter-Martirosyan K.A. Phys. Lett. B, 1982, 111, 247.
4. Кайдалов А.Б. и др. ЯФ, 1986, 43, 1282.
5. Шабельский Ю.М. ЯФ, 1987, 45, 223; Препринт ЛИЯФ №1224, 1986.
6. Shabelsky Yu.M. Preprint LNPI, 1988, 1433.
7. Bialas A., et al. Nuc. Phys. B, 1976, 111, 461.
8. Бозиев С.Н. и др. Препринт ИЯИ АН СССР, П-0630, 1989.
9. Гришин В.Г. Кварки и адроны, М.: Энергоиздат, 1988, 139.
10. Faesler M.A. Preprint CERN-EP/86-102, 1986.
11. Van Hove L. Preprint CERN-TH. 5236/88, 1988.