

## ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 537.591.15

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ЛЕГКИХ ЯДЕР ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ ШАЛ МГУ****Н. Н. Калмыков, В. Н. Калмыков, Г. В. Куликов, В. П. Сулаков, Ю. А. Фомин**  
(НИИЯФ)

E-mail: fomin@eas.sinp.msu.ru

**На основе анализа спектров широких атмосферных ливней (ШАЛ) по числу частиц, измеренных на установке ШАЛ МГУ, определена величина изменения показателя энергетического спектра  $\Delta\gamma$  в области излома. Эта величина оказалась равной  $\Delta\gamma = 1.00 \pm 0.12$ . В работе проводится сопоставление спектра легких ядер, полученных на различных установках.**

**Введение**

Исследование массового состава и первичного энергетического спектра космических лучей (КЛ) в области излома при энергии  $3 \cdot 10^{15}$  эВ, обнаруженного более 40 лет тому назад [1], до сих пор остается одной из актуальных задач физики космических лучей сверхвысоких энергий, поскольку именно эти экспериментальные данные важны для ответа на вопрос о происхождении и распространении КЛ в области энергий излома.

Поскольку исследование области излома прямыми методами в настоящее время не представляется возможным, необходимо использовать косвенный метод, состоящий в изучении ШАЛ. В последние годы этот метод использовался на установках ШАЛ МГУ [2, 3, 4], KASCADE [5], МАКЕТ-АНИ [6] и ряде других. Однако экспериментальные данные разных установок далеки от согласия. Например, на установках KASCADE [5] и МАКЕТ-АНИ [6] получены энергетические спектры отдельных групп ядер первичных КЛ, показатели которых после излома существенно отличаются. На установке KASCADE изменение показателя спектра составляет  $\Delta\gamma \sim 2$ , а на установке МАКЕТ-АНИ  $\Delta\gamma = 0.9$ . Это различие является принципиальным, поскольку при  $\Delta\gamma \leq 1$  еще возможно трактовать излом как следствие диффузионного распространения космических лучей в нашей Галактике, тогда как  $\Delta\gamma \approx 2$  такую возможность исключает [7].

**Анализ экспериментальных данных установки ШАЛ МГУ**

Нами была проведена обработка экспериментальных данных установки ШАЛ МГУ с целью выяснения вопроса об изменении показателя парциальных спектров протонов и ядер гелия. В наших предыду-

щих работах [2–4] был проведен детальный анализ экспериментальных данных на предмет получения наиболее вероятного массового состава первичных космических лучей в области излома. В настоящей работе, принимая за основу полученный массовый состав [4], исследовалось влияние изменения показателя парциальных энергетических спектров на первичный энергетический спектр.

Рассматривались группы ядер: протоны  $p$ , ядра гелия  $He$ , группа  $M$  ( $C-N-O$ ,  $Z = 6 \div 9$ ), группа  $H$  ( $Si-P-S$ ,  $Z = 10 \div 20$ ) и ядра железа  $Fe$ .

Функция, описывающая парциальный энергетический спектр частиц  $i$ -й группы в области излома, задавалась следующим соотношением:

$$I_i(E_0, Z) = \begin{cases} \exp\{-(\gamma_1 - 1)x\}, & x < x_{cr}, \\ \exp\{-(\gamma_1 - 1)x\}_{cr} - (\gamma_2 - 1)(x - x_{cr}), & x \geq x_{cr}, \end{cases}$$

где  $x = \ln E_0$ ,  $x_{cr} = \ln E_{cr}$ ,  $E_{cr} = Z \cdot 3 \cdot 10^{15}$  эВ,  $\gamma_1 = 2.7$  до излома. После излома величина  $\gamma_2$  для всех парциальных спектров принималась одинаковой.

Анализировались величины  $I_{k,exp}$ , представляющие собой наблюдаемое экспериментально количество ливней с числом частиц  $N$  в интервале от  $N_{min}(k)$  до  $N_{max}(k)$ , при этом весь диапазон от  $10^5$  до  $10^7$  был разбит на 20 интервалов (с равномерным шагом по  $\ln N$ ).

Соответствующая теоретическая величина  $I_{k,theor}$  определялась следующим образом:

$$I_{k,theor} = \sum_{i=1}^5 P_i \int_{-\infty}^{+\infty} I_i(E_0, Z) dE_0 \int_{N_{min}}^{N_{max}} W_i(N(E_0, Z)) dN,$$

где  $P_i$  — доля ядер  $i$ -й группы до излома при энергии  $E_0 = 10^{15}$  эВ,  $W_i(N(E_0, Z))$  — плотность

вероятности образования ливня с числом частиц  $N$  первичной частицей группы  $i$  с энергией  $E_0$  и зарядом  $Z$ . Величина  $W_i(N(E_0, Z))$  рассчитывалась по модели QGSJET [8] методом Монте-Карло.

Аналогично можно анализировать данные о спектре ШАЛ по числу мюонов  $N_\mu$  с энергией больше 10 ГэВ (порог регистрации мюонов на установке ШАЛ МГУ). Объединение данных по  $N$  и по  $N_\mu$  позволяет уменьшить статистическую погрешность.

Изменение показателя спектра после излома  $\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$  исследовалось с помощью критерия согласия Пирсона путем минимизации величины  $\chi^2$

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(I_{k,\text{exp}}(N) - I_{k,\text{theor}}(N))^2}{I_{k,\text{theor}}(N)},$$

где суммирование включает данные, относящиеся как к спектру ШАЛ по  $N$ , так и по  $N_\mu$ . Для значений  $\Delta\gamma$  от 0.4 до 2.0 с шагом 0.05 методом перебора с шагом 0.01 для всех  $P_i$  проводилось определение оптимального набора  $P_i$ . Так как величины  $P_i$  связаны очевидным соотношением  $\sum_{i=1}^5 P_i = 1$ , оптимизация требует перебора по четырем переменным.

Проведенный анализ показал, что экспериментальные данные установки ШАЛ МГУ наилучшим образом воспроизводятся при величине  $\Delta\gamma = 1.00 \pm 0.12$ . Полученный результат приведен на рис. 1.

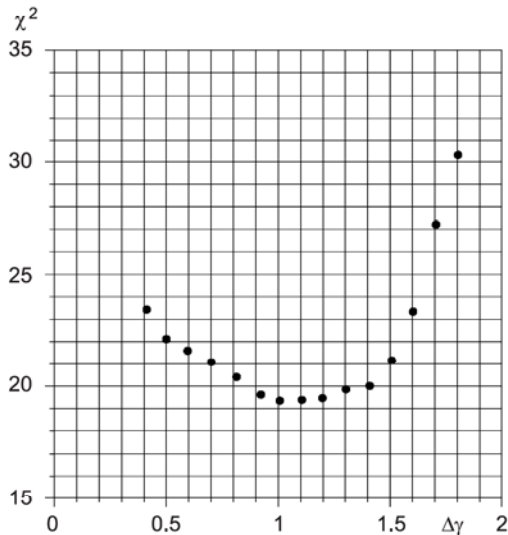


Рис. 1. Зависимость  $\chi^2$  от величины излома  $\Delta\gamma$  в парциальных энергетических спектрах

Этот результат хорошо согласуется с данными установки МАКЕТ-АНИ и на первый взгляд противоречит данным KASCADE. Однако следует учесть, что методика, связанная с использованием спектров ШАЛ по числу частиц, не позволяет с достаточной точностью разделить близкие группы ядер (в частности, протоны и ядра гелия), поскольку характери-

стики ШАЛ от таких групп ядер различаются слабо. Поэтому более разумно ограничиться определением суммарной интенсивности протонов и ядер гелия, несмотря на то что данные по этим группам ядер определены с наилучшей точностью.

Соответствующие результаты, полученные на установках ШАЛ МГУ, KASCADE и МАКЕТ-АНИ, приведены на рис. 2. Все спектры нормированы при энергии излома  $3 \cdot 10^{15}$  эВ, причем нормировка не выходила за систематическую погрешность данных, оцененную в работе [5] как 20–30%. Видно, что данные различных установок хорошо согласуются при энергиях вплоть до  $2.5 \cdot 10^{16}$  эВ и расходятся лишь в той области, где статистические ошибки существенно увеличиваются.

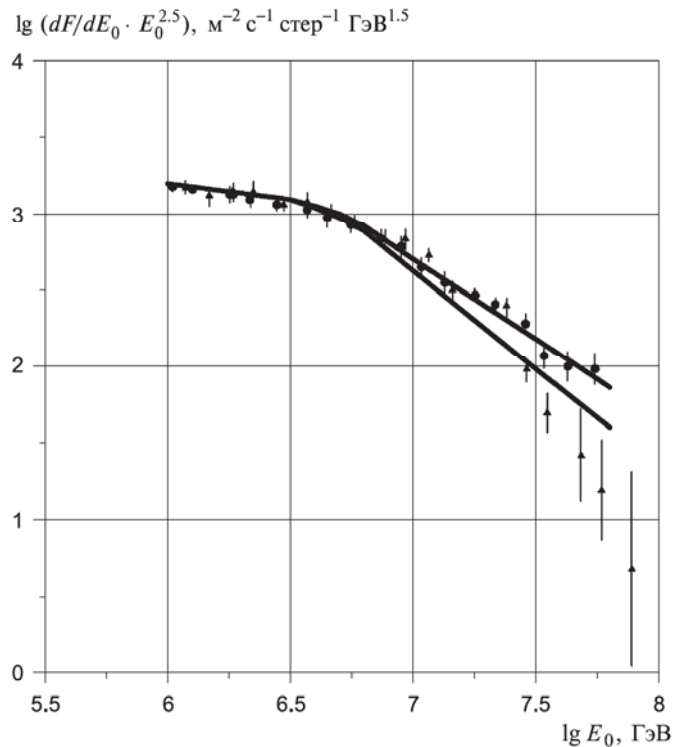


Рис. 2. Первичный энергетический спектр протонов и ядер гелия. Треугольники — экспериментальные данные установки KASCADE [5], кружки — данные эксперимента МАКЕТ-АНИ [6], область между кривыми показывает результаты настоящей работы в пределах значений  $\Delta\gamma = 1.00 \pm 0.12$

### Заключение

В настоящей работе показано, что полученная по данным установки ШАЛ МГУ оценка величины  $\Delta\gamma$  в пределах ошибки согласуется с результатами эксперимента МАКЕТ-АНИ, а с данными KASCADE расходится лишь при энергиях  $\geq 2.5 \cdot 10^{16}$  эВ, где статистические ошибки достаточно велики. Поэтому было бы преждевременно исключать диффузионную модель происхождения излома и объяснять наблю-

даемую форму энергетического спектра КЛ только процессами, происходящими в источниках.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-00540).

#### Литература

1. Куликов Г.В., Христиансен Г.Б. // ЖЭТФ. 1958. **35**, № 4(10). С. 635.
2. Вишневская Е.А., Калмыков Н.Н., Куликов Г.В. и др. // Ядерная физика. 1999. **62**, № 2. С. 300.
3. Вишневская Е.А., Калмыков В.Н., Калмыков Н.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 1. С. 28.
4. Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Сулаков В.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 6. С. 29.
5. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. // *Astropart. Phys.* 2005. **24**. P. 1.
6. Chilingarian A., Ghrahyozyan G., Gharazaryan S. et al. // *Astropart. Phys.* 2007. **28**. P. 58.
7. Калмыков Н.Н., Тимохин А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 3. С. 33.
8. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 1997. **52**. P. 17.

Поступила в редакцию  
21.03.2008