КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 537.591

ИЗМЕНЕНИЕ МАССОВОГО СОСТАВА ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Н. Н. Калмыков, Х. Котсоми, В. П. Сулаков, Ю. А. Фомин

(*НИИЯФ*; *кафедра физики космоса*)

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

Анализируется информация, которую можно извлечь из данных установки ШАЛ МГУ, относительно состава первичного космического излучения (ПКИ) в области энергий выше 10^{17} эВ. Рассматривается проблема существования компоненты космического излучения, не связанной с традиционным механизмом образования галактического космического излучения, а также оценивается доля гамма-квантов в ПКИ.

Введение

Массовый состав ПКИ в области энергий $10^{17}-10^{18}$ эВ был предметом исследования в относительно немногих экспериментах, и полученные данные порой противоречивы (см. работу [1]). Между тем эта область энергий заслуживает тщательного изучения, поскольку именно в ней следует ожидать появления космических лучей иного происхождения по сравнению с теми, которые наблюдаются при более низких энергиях и традиционно связываются со взрывами сверхновых в нашей Галактике. Такое предположение представляется естественным. Действительно, экспериментальные данные [2] показывают, при энергии порядка 10^{17} эВ, излом в парциальных энергетических спектрах ядер ПКИ достигается уже и для ядер железа. Тем не менее показатель спектра всех частиц сохраняет в области $10^{17}-10^{18}$ эВ то же значение, что и при энергиях $10^{16}-10^{17}$ эВ. Поэтому начиная с энергии порядка 10^{17} эВ, в потоке ПКИ должен все больше проявляться вклад космических лучей от источников иного происхождения (например экстрагалактических). Окончательных аргументов в пользу такого заключения еще нет, и необходимы дальнейшие экспериментальные исследования в этой области, что является целью проекта Тунка [1], а также ряда других проектов. За время эксплуатации установки ШАЛ МГУ в период с 1982 по 1989 г. было зарегистрировано более 10^3 ливней с числом частиц $N_e \geqslant 10^7$, что дает возможность исследовать массовый состав ПКИ в интересующей нас области энергий и получить предварительную информацию о дополнительной компоненте ПКИ.

1. Дополнительная компонента ПКИ

Ранее (см. работу [3]) нами было установлено, что экспериментальным спектрам установки ШАЛ МГУ по N_e и N_μ (с энергией выше 10 Гэв) наилучшим образом соответствует энергетический спектр ПКИ, компоненты которого меняют свой показатель с 2.7 на 3.7 при энергии $E_{\text{ст}}(Z) = Z \cdot 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Однако этот состав, оптимальный в области энергий менее 10^{17} эВ ($N_e \leqslant 10^7$), не позволяет описать спектр по N_e при $N_e > 10^7$ (рис. 1). Используя экспериментальные данные и экстраполируя расчетный спектр на область более высоких энергий, можно получить спектр ШАЛ, обусловленный дополнительной компонентой ПКИ.

Этот спектр приближенно дается соотношением (для $10^7 < N_e < 10^8$)

$$I_d(N_e) = (0.50 + 0.20 - 0.14) \cdot 10^{-16} \times \\ \times N_e^{-2.36\pm0.08}\ \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}.$$

Таким образом, показатель спектра оказывается близок к тому, что наблюдается до первого излома (колена). Считая, что дополнительная компонента состоит из протонов, можно найти, что энергетический спектр таких протонов в интервале энергий $5 \cdot 10^{16}-5 \cdot 10^{17}$ эВ при использовании модели QGSJET [4] дается формулой

$$I_d(E_0) = (1.45+0.58-0.41) \cdot E_0^{-2.55\pm0.09}\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}\text{эВ}^{-1}.$$

Существование дополнительной компоненты ПКИ отмечалось и ранее, например в работе [5], где были даны оценки ее интенсивности на основе сравнения данных установки KASCADE с данными других установок при более высоких энергиях. Результаты

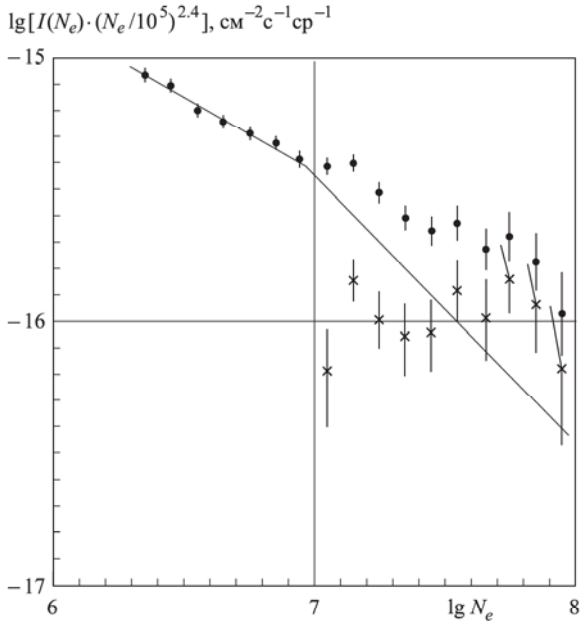

Рис. 1. Экспериментальный спектр ШАЛ по числу частиц по данным установки ШАЛ МГУ (•), расчетный спектр ШАЛ и спектр ШАЛ, генерированных дополнительной компонентой ПКИ (×)

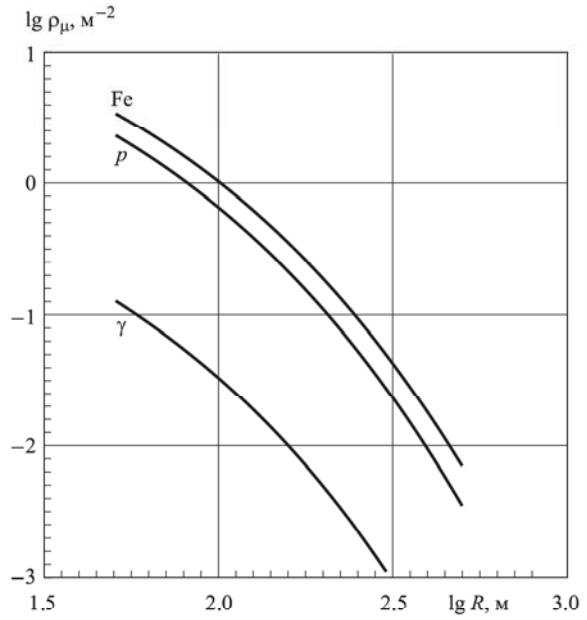

Рис. 2. Средние функции пространственного распределения мюонов с энергией более 10 ГэВ в ШАЛ, генерированных первичными ядрами железа, протонами и гамма-квантами с первичной энергией 10^{17} эВ

настоящей работы методически более корректны, поскольку получены по данным одной установки.

Наличие дополнительной компоненты сказывается на величине $<\ln A>$ — характеристике, обычно используемой для количественного описания массового состава ПКИ. Согласно нашим результатам, $<\ln A> \approx 3.2$ при $N_e \leqslant 10^7$, $<\ln A> \approx 2.3$ при $N_e \approx 3\cdot 10^7$, а при $N_e \approx 10^8$ снижается до 1.7.

Данные установки ШАЛ МГУ по мюонной компоненте также согласуются с отмеченной тенденцией.

2. Оценка доли гамма-квантов в составе ПКИ

Наличие в составе установки ШАЛ МГУ детекторов мюонов общей площадью 80 м^2 позволяет оценить долю гамма-квантов в потоке ПКИ при энергии выше 10^{17} эВ. Метод оценки основан на том, что в ШАЛ достаточно большого размера ($N_e \geqslant 10^7$) отсутствие попадания хотя бы одного мюона с энергией более 10 ГэВ в подземный детектор является событием маловероятным, если ось ШАЛ лежит в пределах круга радиуса 240 м от мюонного детектора и ливень создан протоном или более тяжелым ядром. В то же время такого рода события вполне совместимы с гипотезой, что ливень создан первичным гамма-квантом, поскольку в таком ливне плотность распределения мюонов существенно снижается по сравнению с обычными ливнями (рис. 2). Так, один из безмюонных ливней, упавший в 128 м от детектора, должен был бы иметь среднюю плотность мюонов 0.61 м$^{-2}$, если бы относился к «нормальным» ШАЛ. При такой плотности вероятность нулевого показания такой плотности вероятность нулевого показания детектора составляет менее 10^{-4}, тогда как для ливня, созданного гамма-квантом, она возрастает до величины порядка 0.5. Полная статистика включает 1679 ливней, при этом общее число нулей составляет 48, тогда как из проведенных оценок следует, что их число при данной статистике и в предположении отсутствия гамма-квантов в ПКИ должно составлять около 5.

Таким образом, приходим к оценке доли гамма-квантов в ПКИ при энергии $10^{17}-10^{18}$ эВ, равной $(2.5\pm 0.4)\cdot 10^{-2}$. Однако нельзя исключить возможность недооценки флуктуаций в ливнях от «обычных» космических лучей.

Сравнительно недавно [6] была выполнена оценка верхнего предела доли фотонов по данным Якутской установки ШАЛ в ливнях от частиц предельно высоких энергий, что привело к установлению довольно высокого предела на долю гамма-квантов — 22% при $E_0 > 4\cdot 10^{19}$ эВ и 12% при $E_0 > 2\cdot 10^{19}$ эВ. Полученная нами оценка не противоречит результатам [6], если учесть, что в [6] рассматривались ливни от более высоких энергий. Следует учесть, что, согласно работе [6], те же данные на доверительном уровне 95% совместимы и с гипотезой об отсутствии фотонов в ПКИ, поэтому вопрос нуждается в дополнительном изучении.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ данных установки ШАЛ МГУ при энергиях $10^{17}-10^{18}$ эВ, позволил оценить содержание как дополнительной

компоненты, так и гамма-квантов в составе ПКИ. Полученные данные хотя и являются предварительными, представляют несомненный интерес и дают основания для проведения дальнейших исследований в этой области энергий.

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

Литература

1. *Буднев Н.М., Вишневски Р., Гресс О.А.* и др. // Изв. РАН Сер. физическая. 2005. **69**, № 3. С. 347.
2. *Antoni T., Apel W.D., Badea A.F.* et al. // Astropart. Phys. 2005. **24**. P. 1.
3. *Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Сулаков В.П.* и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 6. С. 29.
4. *Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I.* // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1997. **52B**. P. 17.
5. *Hoerandel J.R.* // Astropart. Phys. 2003. **19**. P. 193.
6. *Glushkov A.V., Gorbunov D.S., Makarov L.T.* et al. // Pis'ma v ZHETF. 2007. **85**, N 3. P. 163.

Поступила в редакцию
03.06.2008