

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПЕРВИЧНЫХ ПРОТОНОВ И ДРУГИХ ЯДЕР В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ 10 – 100 ТэВ/ЧАСТИЦУ

А.Я.Варковицкая, Е.А.Замчалова, В.И.Зацепин, Т.В.Лазарева,  
Г.П.Сажина, Н.В.Сокольская

Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова  
119899 Москва, Россия

Поступила в редакцию 4 марта 1993 г.

В серии из 10 баллонных полетов, начатых в 1975 г. и продолжавшихся до 1987 г., были выполнены прямые измерения энергетических спектров основных компонент первичных космических лучей (ПКЛ). В настоящей статье приводятся результаты, полученные с использованием всей накопленной статистики. Показано, что спектр протонов ПКЛ при энергиях выше 10 ТэВ круче, чем в области меньших энергий, и круче спектров остальных ядер.

Для выяснения, механизмов ускорения и природы источников космических лучей наибольший интерес в экспериментальном плане представляют изменения энергетических спектров основных групп ядер ПКЛ в области энергий выше 1 ТэВ. Впервые такие измерения были выполнены на спутниках "Протон" <sup>1</sup>. Исследование этой области энергий было продолжено в двух баллонных экспериментах с рентгено-эмульсионными камерами: JACEE <sup>2,3</sup> и MUBEE (Moscow University Balloon Emulsion Experiment) <sup>4</sup>, а также в эксперименте "Сокол", выполненном в космическом пространстве <sup>5,6</sup>. В этой статье мы представим суммарные результаты, полученные в эксперименте MUBEE в серии из 6 коротких ( $T \simeq 40$  час) и 4 длительных ( $T \simeq 150$  час) экспозиций.

*Экспериментальная техника.* Каждая рентгено-эмульсионная камера, экспонировавшаяся на баллонах, состояла из 25 слоев свинцового поглотителя и регистрирующих рентгеновских и ядерных пленок между ними. Площадь камеры составляла  $\sim 0,4 \text{ м}^2$ , толщина поглотителя по вертикали 14,7 каскадных единиц. Рентгеновские пленки служили для визуального поиска каскадов и определения их энергии  $\Sigma E_\gamma$ . Энергетическое разрешение по  $\Sigma E_\gamma$  составляет  $\sim 12\%$  и не зависит ни от энергии, ни от типа первичной частицы. Полная энергия первичной частицы типа  $j$  определялась из соотношения

$$E_j = \Sigma E_\gamma / (k_{\gamma,eff})_j.$$

Значения  $(k_{\gamma,eff})_j$  были рассчитаны для спектра с показателем  $\beta = 1,7$  и приняты равными 0,25, 0,17, 0,116, 0,106 и 0,09 соответственно для протонов, ядер гелия и ядер групп М ( $A = 14$ ), Н ( $A = 26$ ) и VH ( $A = 51$ ). Ядерные эмульсии служили для определения траектории частицы, измерения ее заряда и энергетической калибровки методом счета треков. Пространственная точность при прослеживании составляла  $\sim 200 \text{ мкм}$ , угловая точность  $\sim 0,2^\circ$ . Заряд первичных частиц с  $Z \geq 6$  измерялся путем сканирования трека в ядерной эмульсии на сканирующем микрофотометре. Разрешение по  $Z$  составляло 1, 1,7 и 3 единиц заряда соответственно для ядер групп М, Н и VH. Заряд ядер гелия определялся методом счета зерен. Если на траектории каскада не было найдено трека первичной частицы с зарядом  $Z \geq 2$ , то каскад считался

образованным протоном. Фон одиночных  $\gamma$ -квантов из остаточной атмосферы составлял  $\sim 5\%$  от протонных каскадов.

Для определения абсолютного потока вычислялась обобщенная характеристика экспозиции  $\Gamma = \langle S\Omega\eta W \rangle$ . Она учитывала не только геометрический фактор прибора  $S\Omega$ , но и трансформацию первичного потока в остаточной атмосфере  $\eta$  и вероятность взаимодействия в камере при заданных условиях отбора  $W$ .

*Результаты.* Статистические данные о количестве зарегистрированных первичных частиц  $N$  в интервале зенитных углов  $25 - 60^\circ$  приведены в таблице. В ней указаны также факторы экспозиции  $\Gamma T$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{час}$ ) для каждого энергетического интервала и каждого типа первичной частицы. Меньшие значения фактора  $\Gamma T$  в некоторых младших энергетических интервалах связаны с более высокими энергетическими порогами по измеренной энергии  $\Sigma E_\gamma$  в двух длительных экспозициях по сравнению с остальными экспозициями.

$E, \text{ТэВ}$	$p^*$		He		M		H		VH	
	$N$	$\Gamma T$	$N$	$\Gamma T$	$N$	$\Gamma T$	$N$	$\Gamma T$	$N$	$\Gamma T$
10-12,6	194	90								
12,6-15,8	137	113								
15,8-20	104	113	22	50	15	93				
20-25	70	136	11	50	15	93	21	76		
25-40	61	136	8	50	24	141	27	76	3	65
40-80	27	136	4	50	17	141	21	115	2	65
80-160	7	136	5	50	7	141	9	115	2	98
160-320	2	136	0	50	4	141	2	115	0	98
> 320	0	136	1	50	0	141	0	115	0	98

В длительных полетах из-за высокого фона нам не удалось идентифицировать каскады, образованные ядрами гелия (в дальнейшем  $\alpha$ -каскады). Поэтому спектр ядер гелия построен только по шести коротким полетам. Для построения суммарного по всем экспозициям спектра протонов мы использовали смесь протонных и  $\alpha$ -каскадов ( $p^*$  в таблице). В коротких полетах доля  $\alpha$ -каскадов в смеси  $p + \alpha$  составляла  $24 \pm 4\%$ . Поэтому интенсивность протонов мы определяли по формуле

$$i_p = p^* / \Delta E_p \Gamma_p T k_1 k_2,$$

где  $k_1 = 1,24$  учитывает примесь  $\alpha$ -каскадов, а  $k_2 = 1,25$  исправляет завышение интенсивности из-за конечного энергетического разрешения. Интенсивность остальных групп ядер определялась по формуле

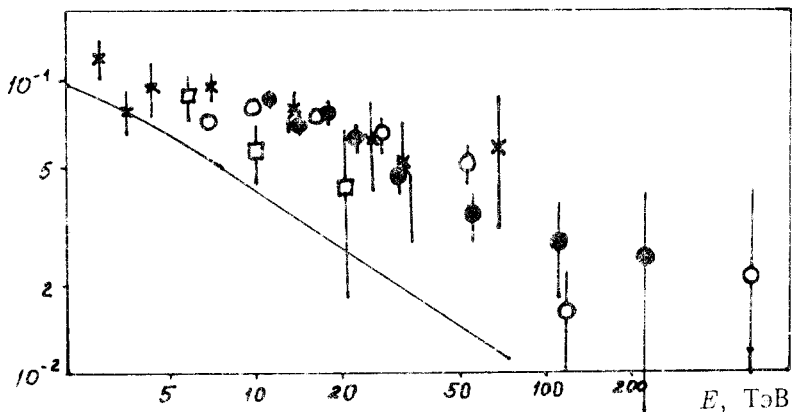
$$i_j = N_j / \Delta E_j \Gamma_j T k_2.$$

*Обсуждение полученных результатов.* Из-за ограниченного объема статьи мы обсудим здесь только данные по протонной компоненте. Полученные нами данные по спектру протонов представлены на рисунке и могут быть описаны в виде

$$i_p = A E^{-(\beta+1)},$$

где  $A = 0,3 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{ТэВ}^{-1}$ , а  $\beta + 1 = 3,14 \pm 0,08$ ,  $E$  в ТэВ.

$$i \cdot E^{2.62}, \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}\text{ТэВ}^{1.62}$$



Энергетический спектр протонов: ● — настоящая работа, ○ — работа <sup>3</sup>, □ — <sup>5</sup>, × — <sup>6</sup>, сплошная линия — модель спектра из работы <sup>1</sup>

Сравнивая с нашей статистика протонных событий для области  $> 10$  ТэВ собрана только коллаборацией JACEE <sup>3</sup>. Из рисунка видно, что в области энергий  $> 10$  ТэВ наши данные и данные JACEE практически совпадают. Такое совпадение приходится констатировать впервые с тех пор, как эти две группы сообщили свои первые результаты по протонному спектру. Наши данные указывали на то, что протонный спектр в области энергий  $> 10$  ТэВ круче, чем в области энергий  $< 1$  ТэВ <sup>7</sup>, в то время как данные JACEE свидетельствовали об отсутствии изменений наклона вплоть по крайней мере до 100 ТэВ <sup>8</sup>. После добавления статистики из длительных полетов ситуация в JACEE стала меняться. В работе <sup>3</sup> авторы отмечают недостаток протонов при высоких энергиях и интерпретируют этот факт как возможное укрупнение спектра в области энергий  $> 40$  ТэВ. Такая интерпретация в значительной степени определяется низкой интенсивностью, измеренной в JACEE в области энергий от 5 до 10 ТэВ (первая точка в данных JACEE на рисунке). Эта точка позволяет авторам провести спектр с наклоном 2,62 вплоть до 40 ТэВ и говорить об изломе только в области более высоких энергий. Спектр протонов, измеренный в эксперименте "Сокол" <sup>6,7</sup>, подтверждает представление о крутом спектре протонов в области энергий  $> 5$  ТэВ, но статистическая точность этих данных невелика.

Увеличение крутизны спектра протонов и отличие его от спектра остальных ядер ПКЛ впервые было обнаружено в работе <sup>1</sup>. Представленные нами данные подтверждают этот результат, но область излома находится, по-видимому, при несколько более высокой энергии, чем в <sup>1</sup>. Так как утверждение об отличии спектров протонов и ядер имеет фундаментальное значение для проблемы происхождения и распространения космических лучей, необходимы дальнейшие детальные измерения спектров ПКЛ непосредственно в районе излома, то есть при энергиях 1–10 ТэВ.

1. Н.Л.Григоров, В.Е.Нестеров, И.Д.Рапопорт и др., ЯФ 11, 1058 (1970).

2. K.Asakimori, T.H.Burnett, M.L.Cherry, et al., Proc. 22 ICRC 2, 57 (1991).

3. K.Asakimori, T.H.Burnett, M.L.Cherry et al., Proc. 22 ICRC 2, 97 (1991).
4. V.I.Zatsepin, G.P.Sazhina, N.V.Sokolskaya et al., Proc. 21 ICRC 3, 81 (1990).
5. Н.Л.Григоров, ЯФ 51, 157 (1990).
6. I.P.Ivanenko, V.Ya.Shestoperov, L.O.Chikova et al., Proc. 21 ICRC 3, 77 (1990).
7. K.V.Mandritskaya, G.P.Sazhina, N.V.Sokolskaya et al., Proc. 19 ICRC 6, 228 (1985).
8. T.H.Burnett, S.Dake, J.H.Derriokson et al., Ap. J., 348: L25-L28 (1990).