ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК

Т. 57, № 7 СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ 1993

УДК 539.1.03

© 1993 г. И. П. ИВАНЕНКО, В. Я. ШЕСТОПЕРОВ, Д. М. ПОДОРОЖНЫЙ, И. Д. РАПОПОРТ, Г. А. САМСОНОВ, В. А. СОБИНЯКОВ, А. Н. ТУРУНДАЕВСКИЙ, И. М. ФАТЕЕВА, Л. А. ХЕЙН, Л. О. ЧИКОВА, И. В. ЯШИН

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ ЭНЕРГИЯХ ВЫШЕ 2 ТэВ, ИЗМЕРЕННЫЕ АППАРАТУРОЙ «СОКОЛ»

Приведены данные, полученные в экспериментах «Сокол», о спектрах протонов, ядер He и ядер групп M, H и VH по увеличенной в ~1,5 раза статистике за счет обработки событий, лавины от которых выходят через боковые поверхности прибора «Сокол-2» и проходят в калориметре путь не менее 3,5 λ_p. Анализ отношения интенсивностей различных зарядовых групп указывает на отличие спектра протонов от спектра других ядер.

Изучение энергетического спектра и химического состава первичных частиц космических лучей в области энергий $E > 1$ ТэВ имеет первостепенное значение для астрофизического и ядерно-физического аспектов физики космических лучей. Особый интерес представляет детализация спектра протонов в связи с противоречивыми данными, полученными различными экспериментальными группами, проводившими прямые исследования космических лучей в данной энергетической области [1—4]. Различия в энергетических спектрах отдельных компонент, если бы они были доказаны, дали бы ценную информацию для детализации представлений о природе источников космических лучей при энергиях до $\sim 10^{15}$ эВ.

В работах [2, 5—7] нами были приведены результаты измерения частиц первичного космического излучения в диапазоне энергий 2—100 ТэВ, выполненных на ИСЗ «Космос-1543» и «Космос-1713» в 1984—1986 гг. с использованием аппаратуры «Сокол» и «Сокол-2». Энергия измерялась железным калориметром глубиной 5,5 протонных пробегов λ_p, а заряд — твердотельными черенковскими детекторами. Детально прибор описан в работе [8].

Анализ обработанного ранее материала дает указание на следующие особенности в спектрах различных компонент космических лучей. В [5, 7] отмечено статистически необеспеченное указание на возможное укручение спектра протонов после 20 ТэВ. В работе [7] из анализа дифференциального спектра всех частиц делается предположение о дефиците частиц в диапазоне энергий 15—30 ТэВ. Аналогичный эффект в работе [9] связывается с возможным недостатком протонов в диапазоне энергий ~30 ТэВ. В [5, 7] отмечено уменьшение почти вдвое отношения интенсивности протонов к интенсивности ядер He по сравнению с отношением, измеренным в диапазоне энергий 20—100 ГэВ/нуклон [10, 11]. В работах [3, 6] отмечено, что показатель спектра ядер He при энергиях $E > 1$ ТэВ по абсолютной величине меньше, чем при энергиях $E \geq 50$ ГэВ.

Приведенные в [2, 5—7] данные относились к событиям, в которых траектория первичной частицы пересекала верхнее и нижнее основания калориметра. Продолжение обработки данных эксперимента «Сокол-2» позволило включить в публикуемый материал события, в которых ось каскада выходит из калориметра через его боковую поверхность. В соответствии с условиями выработки управляющего сигнала наложено требование прохождения каскадом в калориметре толщи вещества не менее 3,5 λ_p. Энергетическая поправка на вынос энергии через нижнее основание калориметра проводилась с той глубины калориметра,

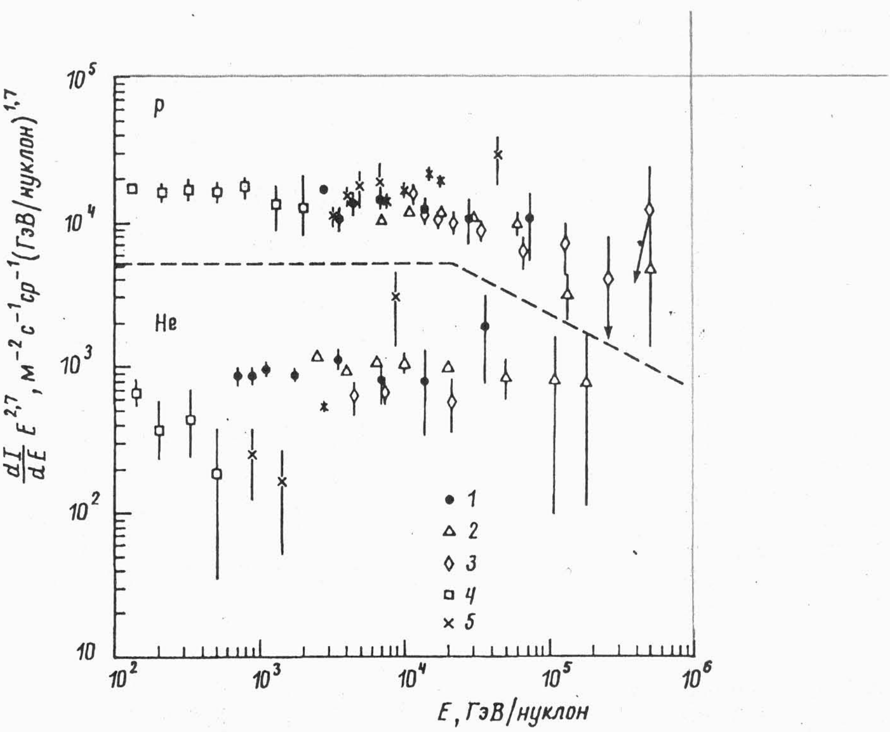

Рис. 1. Дифференциальные энергетические спектры протонов и ядер He. Точки *1* — данные настоящей работы. *2* — [3], *3* — [4], *4* — [10], *5* — [12]

где ось каскада находилась на расстоянии не менее 6 см от боковой поверхности калориметра. Такой метод позволил избежать неопределенностей поправок на вынос энергии через боковые поверхности и привел к сдвигу энергетической шкалы у ранее опубликованных событий на ~6% для протонов и на 3—5% для других групп ядер.

На рис. 1 приведены дифференциальные энергетические спектры протонов и ядер He по нашим данным и по работам [3, 4, 10, 12]. В связи с тем что для дополнительных событий, развивающихся в калориметре меньшей толщины, «пороговый эффект» сказывается в большем энергетическом интервале, по увеличенной статистике материал представлен для протонов с $E > 5$ ТэВ, для ядер He с $E > 1$ ТэВ/нуклон. Прирост статистики при этих энергиях по отношению к данным в работах [2, 5—7] составил более 50%. В области меньших энергий интенсивности получены по ранее опубликованному статистическому материалу.

Аппроксимация разными авторами полученных ими экспериментальных точек единой степенной зависимостью приводит к следующим результатам для спектров протонов и ядер He.

Настоящая работа:

$$dI_p/dE = (1{,}49 \pm 0{,}11)\cdot 10^{-1}E^{-(2{,}85\pm 0{,}14)}\ (\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{с}\cdot\text{ТэВ})^{-1} \quad \text{при} \quad E > 5\ \text{ТэВ},$$

$$dI_{\text{He}}/dE = (8{,}10 \pm 0{,}50)\cdot 10^{-3}E^{-(2{,}64\pm 0{,}12)}\ (\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{с}\cdot\text{ТэВ/нуклон})^{-1}$$
при $E > 1$ ТэВ/нуклон.

Группа JACEE [3]:

$$dI_p/dE = (1{,}30 \pm 0{,}30)\cdot 10^{-1}E^{-(2{,}86\pm 0{,}07)}\ (\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{с}\cdot\text{ТэВ})^{-1} \quad \text{при} \quad E > 5\ \text{ТэВ},$$

$$dI_{\text{He}}/dE = (9{,}96 \pm 1{,}92)\cdot 10^{-3}E^{-(2{,}72\pm 0{,}09)}\ (\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{с}\cdot\text{ТэВ/нуклон})^{-1}$$
при $E > 1{,}3$ ТэВ/нуклон.

На рис. 2 приведены дифференциальные энергетические спектры ядер групп

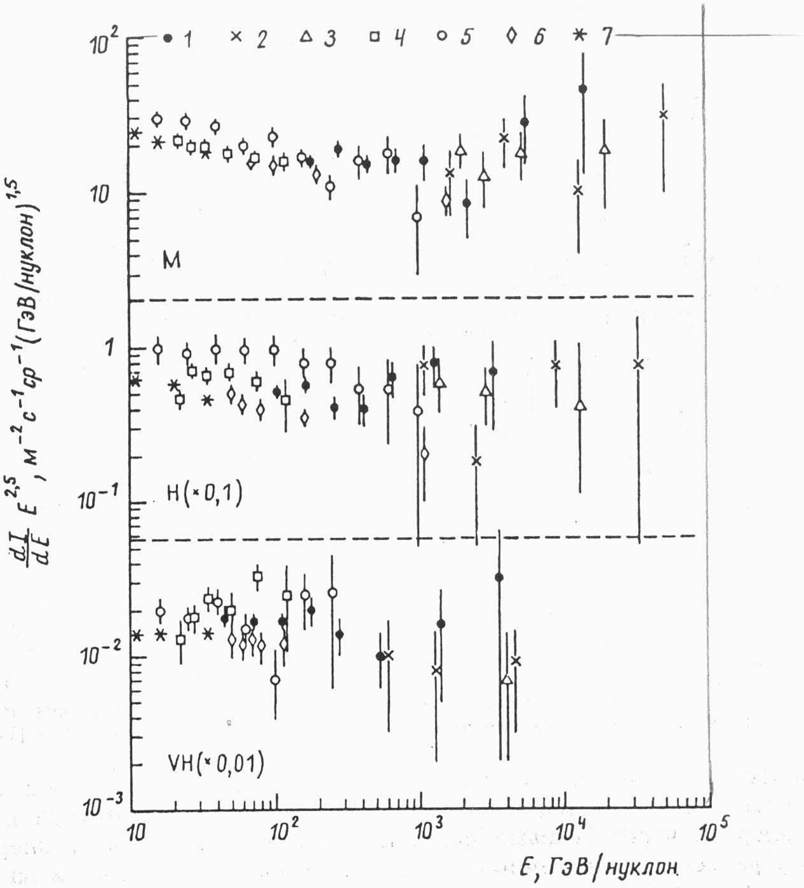

Рис. 2. Дифференциальные энергетические спектры ядер групп M, H и H. Точки *1* — данные настоящей работы, *2* — [3], *3* — [4], *4* — [13], *5* — [14], *6* — [15], *7* — [16]

M, H и VH, полученные суммированием данных первого эксперимента и увеличенной статистикой второго эксперимента. Также представлены данные из работ [3, 4, 13—16]. По нашим экспериментальным данным энергетические спектры ядер описываются следующими показателями: $\gamma_M = -2{,}85 \pm 0{,}07$; $\gamma_H = -2{,}49 \pm 0{,}07$; $\gamma_{VH} = -2{,}62 \pm 0{,}08$.

В таблице приведен зарядовый состав и отношения различных компонент космических лучей при разных энергиях на ядро по нашим экспериментальным данным.

Величина отношения p/He дается авторами [10] равной 26 ± 3 при энергиях около 60 ГэВ/нуклон и авторами [11] равной 24 ± 3 при энергиях 20—100 ГэВ/нуклон.

Из отношения интенсивностей следует, что в области энергий $E \geq 1$ ТэВ доля протонов по отношению ко всем другим зарядовым группам (p/He и p/M+H+VH) уменьшается. В этой области энергий энергетический спектр ядер He приближается к спектру других тяжелых ядер, что отличает его поведение от поведения при энергиях $E \leq 100$ ГэВ, где энергетическая зависимость интенсивности ядер He описывается дифференциальным показателем $\gamma \sim 2{,}75—2{,}80$ [10], в то время как спектры тяжелых ядер описываются показателем $\gamma \approx$ $\approx 2{,}55—2{,}65$ [13].

Отношение интегральных потоков протонов и ядер He при энергиях выше 5 ТэВ на частицу по нашим данным составляет $1{,}32 \pm 0{,}14$. При спектре ядер

E, ТэВ	p, %	He, %	M, %	H, %	VH, %	M+H+VH, %	p/He	p/M+H+VH	He/M+H+VH
> 2,5	39 ± 3	27 ± 2	13 ± 1	10 ± 1	11 ± 1	34 ± 2	1,44 ± 0,15	1,14 ± 0,11	0,79 ± 0,07
> 5	37 ± 3	28 ± 2	14 ± 2	9 ± 1	12 ± 2	35 ± 3	1,32 ± 0,14	1,06 ± 0,12	0,80 ± 0,09
> 10	31 ± 5	30 ± 4	14 ± 3	13 ± 3	12 ± 3	39 ± 5	1,03 ± 0,21	0,79 ± 0,16	0,77 ± 0,14

гелия с показателем $\gamma - 1 = 1{,}64$ это соответствует отношению при энергии $E >$ >5 ТэВ/нуклон, равному 12,8 ± 1,4. Группа JACEE [3] дает значение этого отношения при энергиях в районе 10 ТэВ/нуклон 12,2 ± 2,1. Следовательно, отличие этого отношения от полученного при энергиях 10—100 ГэВ/нуклон находится за пределами статистических ошибок.

Сравнительно быстрое, двукратное уменьшение отношения p/He хорошо согласуется с моделью генерации космических лучей, описанной в работе [17]. Данная модель предполагает, что при высоких энергиях состав космических лучей отражает (с учетом поправок на распространение в Галактике) содержание элементов в звездном ветре звезд, взрывающихся как сверхновые, в том числе обедненных водородом звезд типа Вольфа—Райе.

Рассмотренные экспериментальные данные, а также упомянутые модельные представления подчеркивают, что для выяснения вопроса о характере спектров протонов и ядер He необходимо не только дальнейшее увеличение статистического материала при энергиях выше 1 ТэВ, но и эксперимент по измерению спектров протонов и ядер He в расширенной области энергий, начиная с 100 ГэВ/нуклон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grigorov N. L. et al.*//Proc 12th ICRC. Hobart. 1971. V. 5. P. 1760.
2. *Иваненко И. П. и др.*//Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. С. 468.
3. *Asakimori et al.*//Proc 22nd ICRC. Dublin. 1991. V. 2. P. 57.
4. *Zatcepin V. L. et al.*//Proc 21st ICRC. Adelaida. 1990. V. 3. P. 81.
5. *Иваненко И. П. и др.*//ВАНТ. Сер. Техника физического эксперимента. 1989. Вып. 4(4). С. 40.
6. *Ivanenko I. P. et al.* Proc. 21st ICRC. Adelaida. 1990. V. 3. P. 77.
7. *Ivanenko I. P. et al.* Proc. 5th Intern. Symp. Very High Energy Cosmic Ray Interaction. Lodz, Poland, 1989. V. 2. P. 197.
8. *Григоров Н. Л. и др.*//Вестн. МГУ. Сер. 3, Физика, астрономия. 1988. Т. 29. № 5. С. 44.
9. *Chubenko A. P. et al.*//Proc. 20th ICRC. Moscow. 1987. V. 1. P. 377.
10. *Ryan M. J. et al.*//Phys. Rev. Lett. 1972. V. 28. P. 985.
11. *Webber W. R. et al.*//Proc. 20th ICRC. Moscow. 1987. V. 2. P. 463.
12. *Kawamura et al.*//Phys. Rev. D. 1989. V. 40. P. 729.
13. *Juliusson E.*//Astrophys. J. 1974. V. 191. P. 331.
14. *Simon M. et al.*//Astrophys. J. 1980. V. 239. P. 712.
15. *Meyer P. et al.*//Proc. 22nd ICRC. Dublin. 1991. V. 2. P. 21.
16. *Engelmann J. J. et al.*//Astron. Astrophys. 1990. V. 233. P. 96.
17. *Silberberg R., Tsao C. N.*//Astrophys. J. Lett. 1990. V. 352. P. 49.

Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова