

Чтобы оценить ситуацию вне центра области и в периоды нарастания и падения поля, произведем численное интегрирование уравнения движения частицы. Оно показывает, что для траекторий, проходящих вблизи центра, ускорения различных порядков имеют тот же порядок величины, что и в центре области, но по мере удаления от центра различие между компонентами ускорения одного приближения, имеющееся в центре области, исчезает. Отношение $|\omega^{(2)}|/|\omega^{(1)}|$, близкое к $1,10 \cdot 10^{-10}$, почти не меняется. Для траекторий, значительно удаленных от центра или имеющих большое опережение или запаздывание по отношению к максимуму поля, оно иногда имеет большой порядок величины (от 10^{-7} до 10^{-5}), но не за счет увеличения $|\omega^{(2)}|$, а за счет местного уменьшения величины $|\omega^{(1)}|$.

Из всех рассмотренных случаев расчета мы видим, что первое приближение для силы торможения излучением в рассматриваемой системе отсчета имеет тот же порядок, что и сила, действующая со стороны внешнего поля, а высшие поправки к ней быстро убывают с фактором от 10^{-7} до 10^{-10} . Следовательно, хотя уравнение (1) является точным, а уравнение с торможением в первом порядке — приближенным, при численных расчетах с рассматриваемыми порядками полей всеми высшими членами разложения (2) можно вполне пренебречь. Они могут понадобиться лишь при рассмотрении значительно более сильных или быстрее меняющихся полей.

Наша оценка показывает, что в некоторых случаях отношение $|\omega^{(2)}|/|\omega^{(1)}|$ может оказаться на границе измеримости, но дискриминация его от нуля может быть весьма трудной. Более подробные расчеты отклонения быстрых частиц импульсным полем с учетом реальной экспериментальной обстановки могут показать, можно ли поставить эксперимент для опровержения гипотезы, что $|\omega^{(2)}|=0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Клепиков Н. П. // УФН. 1985. 146, № 2. С. 317—339. [2] Romeranchuk I. // J. Phys. USSR. 1940. 2. P. 65—69. [3] Erber T. // Fortschr. Phys. 1961. 9. P. 343—392. [4] Herrera J. C. // Phys. Rev. D. 1977. 15. P. 453—456. [5] Rohrlich F. Classical charged particles. N. Y.: Addison-Wesley, 1965, sect. 6—6, 6—8. [6] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М., 1962. [7] Hale J. K., Stokes A. P. // J. Math. Phys. 1962. 3. P. 70—74.

Поступила в редакцию
17.06.86
После переработки
07.08.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 1

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 537.591

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ СРЕДНИХ И ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ 50—1000 ГэВ/НУКЛОН

И. П. Иваненко, Н. Л. Григоров, В. Я. Шестоперов, Ю. В. Басина,
П. В. Вакулов, Ю. Я. Васильев, Р. М. Голынская, Л. Б. Григорьева,
Д. А. Журавлев, В. И. Зацепин, А. Е. Казакова, В. Д. Козлов, И. П. Кумпан,
Ю. А. Лапути, Л. Г. Мищенко, В. М. Никаноров, Л. П. Папина,
В. В. Платонов, Д. М. Подорожный, И. Д. Рапопорт, Г. А. Самсонов,
Л. Г. Смоленский, В. А. Собиняков, В. К. Соколов, Г. Е. Тамбовцев,
Ч. А. Третьякова, Ю. В. Тригубов, И. М. Фатеева, Л. А. Хейн, Л. О. Чикова,
В. Я. Ширяева, Б. М. Яковлев, И. В. Яшин

(НИИЯФ)

Измерение энергетических спектров различных групп ядер первичных космических лучей высокой энергии является одной из актуальных задач физики и астрофизики космических лучей [1]. Малый поток таких частиц создает большие трудности при их регистрации. Поэтому прямые измерения энергетических спектров и зарядового состава проведены для ядер с $Z \gg 3$ в области до ~ 100 ГэВ/нуклон, где имеется достаточно однозначная информация [2]. При больших энергиях имеются данные двух работ [3, 4]. В работе [3] энергетические спектры углерода измерены в области до 600 ГэВ/нуклон, кислорода — до 1000 ГэВ/нуклон и железа — до 250 ГэВ/нуклон.

Однако при энергии ~ 100 ГэВ/нуклон и выше результаты имеют большие статистические ошибки (указанные верхние пределы соответствуют полной энергии для ядер углерода ~ 7 ТэВ, кислорода ~ 16 ТэВ и железа ~ 14 ТэВ). В работе [4] измерены только показатели энергетических спектров таких же ядер до 1000 ГэВ/нуклон, никаких данных об интенсивности не приводится. Можно считать, что в области энергий свыше 100 ГэВ/нуклон еще необходимо проведение измерений энергетических спектров первичных космических частиц.

Измерение энергетических спектров ядер углерода, кислорода и группы железа проводилось с помощью прибора «Сокол», установленного на ИСЗ «Космос-1543» в марте—апреле 1984 г. [5, 6]. Прибор представлял собой ионизационный калориметр (ИК) общей толщиной около 5,5 пробега для взаимодействия протонов. 80 синциллиационных детекторов ионизации позволяли восстанавливать геометрию лавины частиц в ионизационном калориметре и определять число частиц $N(x)$ на десяти разных глубинах.

Над ионизационным калориметром находились детекторы заряда первичной частицы двух типов: ДЗ-1 (для измерения Z в интервале от 1 до 5) и ДЗ-2 (для измерения Z в интервале от 5 до 50). Описание прибора «Сокол» дано в [7], а метод измерения зарядов детекторами ДЗ-2 описан в [8]. Черенковские счетчики ДЗ-2 полностью перекрывали телесный угол ИК, черенковские счетчики ДЗ-1, находящиеся под ДЗ-2, перекрывали примерно 75% их площади. Поэтому частицы, прошедшие через ДЗ-1, как правило, проходили и через ДЗ-2, в то время как частицы, зарегистрированные в ДЗ-2, с вероятностью $\sim 25\%$ могли попасть в промежутки между счетчиками ДЗ-1.

Регистрация частиц высокой энергии в приборе «Сокол» происходила при выполнении следующих условий: а) в любом из 11 счетчиков ДЗ-1 должен быть сигнал, больший минимального, соответствующего амплитуде $\sim 0,3$ от наиболее вероятной амплитуды, создаваемой частицей с $Z=1$; б) в любых семи или восьми рядах ИК (из десяти) должен быть сигнал, соответствующий энерговыделению в поглотителе над рядом более 35 ГэВ; в) полное энерговыделение в ИК должно быть более 1,5 ТэВ.

При выполнении условий а—в вырабатывался управляющий сигнал, который давал разрешение на регистрацию амплитуд импульсов во всех датчиках. Измеренные амплитуды (80 синциллиаторов ИК и 15 детекторов заряда) запоминались в оперативной памяти прибора и записывались на запоминающее устройство. Во время записи действовала блокировка, исключавшая регистрацию новой частицы.

Переданная по радио информация была обработана на ЭВМ, и для каждой частицы восстанавливалась картина распределения ионизации в ИК и детекторах заряда. Пример получаемой о каждой зарегистрированной частице информации показан на рис. 1. Здесь высота заштрихованного прямоугольника дает в относительных единицах число частиц лавины, прошедших через данный детектор ионизации (a и b — две взаимно перпендикулярные проекции прибора). Черные прямоугольники над ИК — детекторы заряда, зарегистрировавшие частицу. Имея для каждой первичной частицы такую информацию, можно отобразить частицы с данным значением заряда и получить их распределение по энергии.

Для построения энергетических спектров ядер углерода, кислорода и ядер группы железа отбирались частицы, проходящие как через счетчики ДЗ-2, так и через счетчики ДЗ-1 (последнее требование необходимо для срабатывания установки). При этом отбирались события, для которых сигнал в ДЗ-1 был больше сигнала от частицы с $Z=2$. Заряд ядра определялся по показаниям детекторов ДЗ-2. Вводимые поправки, калибровка детекторов и точность измерения зарядов описаны в [8].

С учетом разрешающей способности детекторов ДЗ-2 к ядрам углерода относили все частицы со значениями Z в интервале $5 \leq Z \leq 7$, к ядрам кислорода — частицы с Z в интервале $7 < Z < 9$. В интервал $5 < Z < 7$ попадает около 20% ядер бора и азота, а в интервал $7 < Z < 9$ примерно 10% ядер азота, что было учтено при определении интенсивности ядер углерода и кислорода.

К ядрам группы железа относили все частицы с Z в интервале $22 \leq Z \leq 29$. Если зарядовый состав этих ядер такой же, как и при меньших энергиях [9], то среди этой группы ядер с учетом разрешающей способности ДЗ-2 ядра железа с $Z=26$ составляют около 75%.

Энергия частиц определялась по обычным формулам ионизационного калориметра. При этом вводилась поправка в 16% на долю энергии, выходящую через нижнее основание ИК. Эта доля оказалась не зависящей от Z . Кроме того, была введена поправка на ядерные расщепления. Более подробно введение методических поправок и переход к интенсивности частиц с заданной энергией на нуклон описаны в [8].

Полученные за 257 ч чистого времени экспозиции при геометрическом факторе $325 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ энергетические распределения ядер углерода, кислорода и группы железа построены по 72, 76 и 92 событиям и представлены на рис. 2, а, б и в соответственно. Степень согласия экспериментальных данных с соотношением $Ie^{2,5} = \text{const}$ при четы-

рех степенях свободы ($\nu=4$) составляет $\chi^2=3,9$; 5,3 и 1,3 для ядер углерода, кислорода и железа соответственно.

Спектр ядер группы железа, приведенный на рис. 2, в, несколько отличается от наших данных, приведенных в [8], что связано с разными условиями отбора событий; это отличие не выходит за пределы статистических ошибок. На рис. 2, в приведен также спектр ядер железа с $Z=26$. По абсолютной величине потоки ядер не противоречат известным значениям потоков при энергиях не более 100 ГэВ/нуклон [2, 10, 11], в пределах ошибок согласуются с данными [3] и в несколько раз расширяют энергетическую область прямых измерений.

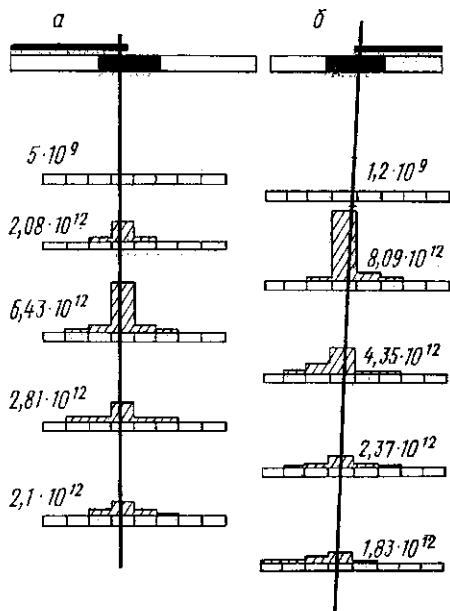


Рис. 1. Пример регистрации ядра кислорода ($Z=8$) с энергией $E_0=32,5$ ТэВ

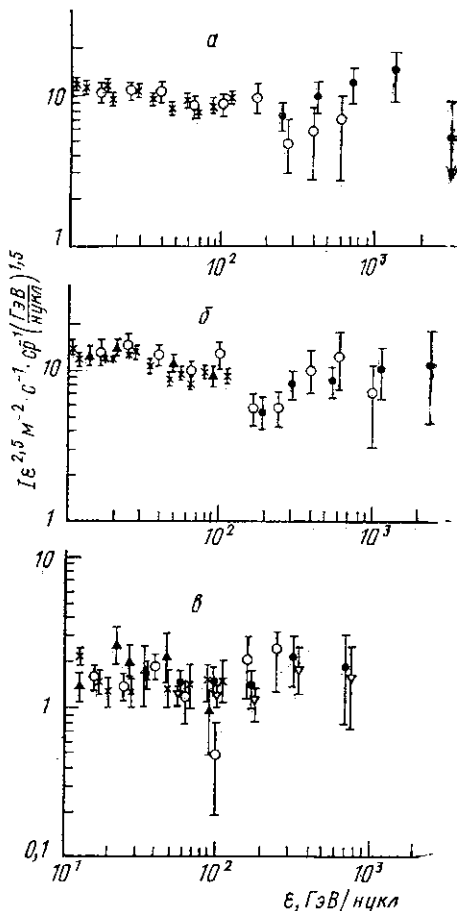


Рис. 2. Дифференциальные энергетические спектры ядер углерода (а), кислорода (б) и группы железа (в): \circ — [3], \blacktriangle — [10], \times — [11], \bullet — данный эксперимент; ∇ — спектр ядер с $Z=26$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Березинский В. С., Буланов С. В., Гинзбург В. Л. и др. Астрофизика космических лучей. М., 1984. [2] Juliusson E. // Proc. 18th Intern. Cosmic Ray Conf. 1983. V. 12. P. 117—134. [3] Simon M., Spiegelhauer H., Schmidt W. K. H. et al. // Astrophys. J. 1980. 239, N 2, part 1. P. 712—724. [4] Авунджян А. Т., Акоюн Л. Г., Аматыни А. Ц. и др. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1982. 46, № 9. С. 1663—1666. [5] Вернов С. Н., Вакулов П. В., Григоров Н. Л. и др. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1985. 49, № 7. С. 1399—1401. [6] Vernov S. N. et al. // Proc. 19th Intern. Cosmic Ray Conf. 1985. V. 2. P. 52—55. [7] Vernov S. N. et al. // Proc. 17th Intern. Cosmic Ray Conf. 1981. V. 8. P. 49—52. [8] Иваненко И. П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физ. Астрон. 1986. 27, № 6. С. 81—83. [9] Shapiro M. M., Silberberg R. // Phyl. Trans. Roy. Soc. 1975. 277. P. 317—329. [10] Caldwell J. H. et al. // Astrophys. J. 1977. 218. P. 269—285. [11] Chappell J. H., Webber W. R. // Proc. 17th Intern. Cosmic Ray Conf. 1981. V. 2. P. 59—62.

Поступила в редакцию
04.06.86