

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР СТВОЛОВ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

С.И. Никольский, А.П. Чубенко

Наблюдаемый в глубине атмосферы (690 г/см^2) энергетический спектр широких атмосферных ливней по суммарной энергии адронов в стволах имеет "излом", полностью соответствующий "излому" энергетического спектра первичного космического излучения.

Энергетический спектр первичного космического излучения высокой энергии характеризуется резким увеличением своего показателя в области энергий $10^3 - 10^4$ ТэВ при степенной форме его аппроксимации. Величина показателя спектра $I(\geq E_0) \propto E_0^\gamma$ увеличивается от $\gamma = 1,60 - 1,65$ при $E_0 \leq 10^3$ ТэВ до $\gamma = 2,0 - 2,1$ при $E_0 > 10^4$ ТэВ. Эта особенность энергетического спектра ("излом") установлена при исследованиях спектров широких атмосферных ливней (ШАЛ) по числу электронов /1,2/ и по числу мюонов /1/ в глубине атмосферы. Однако уже в ранних обсуждениях этих результатов отмечалась необходимость исследований стволов широких атмосферных ливней, где на небольшом числе частиц сосредоточена энергия, сравнимая с суммарной энергией ливня на уровне наблюдения.

В электромагнитном каскаде связь между полным потоком электронов и энергией в стволе ливня достаточно надежно определяется теорией. Связь между потоками энергии в адронной, мюонной и электронно-фотонной компонентах широких атмосферных ливней может быть установлена лишь экспериментально. Структура широких атмосферных ливней и их центральной области с первичной энергией $E_0 \leq 10^{15}$ эВ исследована в памирских и тянь-шаньских экспериментах /3,4,5/. В области энергий, соответствующей излому первичного спектра и выше, статистически обеспеченных данных о стволах ливней с измерениями энергии адронной компоненты не публиковалось.

Длительная эксплуатация ионизационного калориметра тянь-шаньской комплексной установки /6/ позволила накопить экспериментальные данные о случаях прохождения стволов широких ливней через калориметр площадью $6 \times 6 \text{ м}^2$. Энергия адронов в стволе широкого атмосферного ливня определялась по выделяемой адронами в калориметре энергии на глубине более 20 радиационных единиц. Величина недомера энергии за счет конечной толщины поглотителя калориметра принималась равной 20% независимо от величины энерговыделения E . Интегральный спектр по суммарной энергии адронной компоненты E в стволах ливней за 5785 часов измерений приведен на рис. 1. Видно, что наблюдаемый энергетический спектр не может быть аппроксимирован степенной функцией с постоянным показателем. Учитывая это, показатель спектра a в области энергий ниже 10^{14} эВ следует определять по дифференциальному спектру (рис.2). В указанной области энергий $a + 1 = 2,48 \pm 0,03$. В области энергий $E > 10^{14}$ эВ из дифференциального энергетического спектра и из интегрального следует значение $a = 1,90 \pm 0,06$, что означает равенство отношений a/γ до и после изменения величин a и γ . Экспериментальные данные, приведенные на рис. 1, позволяют утверждать также, что область изменения показателя γ весьма ограничена по шкале энергий, а не распространяется на 20-кратный интервал, как следует из диффузионной модели галактических космических лучей.

В работе /4/ приведено выражение, связывающее поток энергии адронов в центральных областях ливней с числом электронов N_e в интервале $2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$ на уровне наблюдения: $\rho_a = 5,5 \cdot r^{-1,6 \pm 0,2} N_e \text{ МэВ} \cdot \text{м}^{-2}$. Пренебрегая флуктуациями в соотношении между числом электронов и энергией адронной компоненты ствола ШАЛ и предполагая равномерное распределение осей ливней по площади калориметра, величину энерговыделения в калориметре можно привести в соответствие с числом электронов в ливне N_e . Как видно из рис. 1, область изменения показателя a в энергетическом спектре по N_e соответствует обычно указываемому числу электронов для высоты ТШВНС ФИАН.

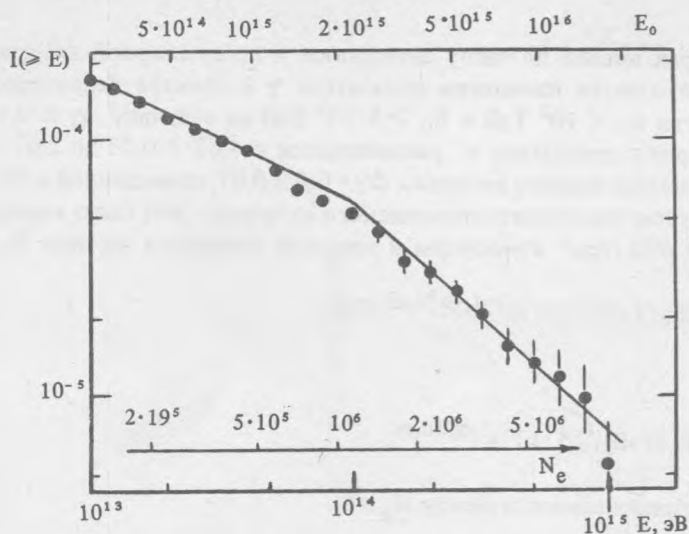


Рис. 1. Интегральный спектр ШАЛ по суммарной энергии адронов E в стволах. Интегральный поток $I(>E)$ умножен на E и дан в $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}\text{ТэВ}$. Соответствующие E значения энергии первичной частицы и числа электронов ШАЛ представлены на осях E_0 и N_e . Прямыми показана степенная аппроксимация спектра с двумя значениями показателя α .

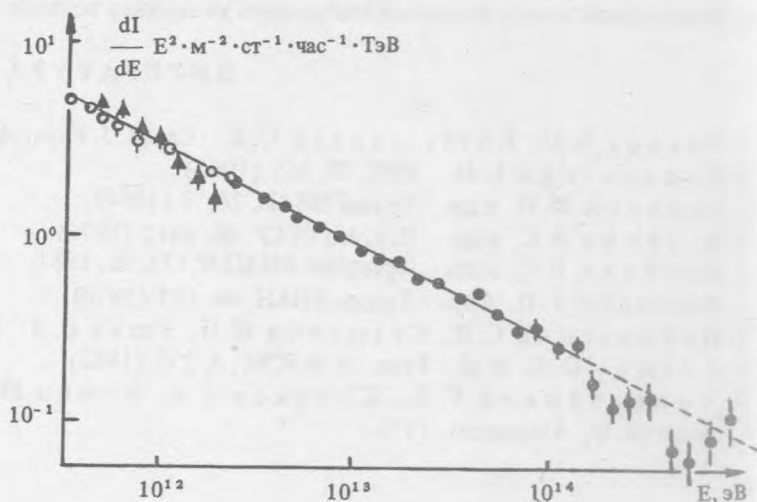


Рис. 2. Дифференциальный спектр суммарной энергии адронов в стволах ШАЛ (темные и светлые кружки) и спектр всех адронов (треугольники).

Для установления связи энерговыделения в калориметре с энергией первичной частицы E_0 воспользуемся условием равенства абсолютных значений интенсивностей в наблюдаемом спектре и спектре первичных частиц [7]. На рис. 1 шкала E_0 получена таким образом: излом в спектре энерговыделений в калориметре соответствует характерной энергии "излома" первичного спектра, указываемой практически во всех работах, посвященных этой проблеме.

Дифференциальный спектр стволов ливней по суммарной энергии адронов приведен на рис. 2 в широкой области энергий $3 \cdot 10^{11} - 10^{15}$ эВ для двух серий измерений. Экспериментальные данные для энергий $E < 10^{14}$ эВ характеризуются степенной зависимостью с показателем 2,5. Это указывает на то, что используемое при анализе данных предположение о независимости недомера энергии адронов в калориметре от энергии ствола оправдывается в эксперименте.

На рис. 2 показан также энергетический спектр полного потока адронов [8]. Совпадение интенсивностей полного потока адронов и потока стволов ливней объясняется тем, что в этой области энергий отдельные адроны ствола ливня расходятся на расстояния, сравнимые с размерами калориметра.

В заключение отметим:

1. Хорошее соответствие изломов в спектрах ливней по числу электронов и по суммарной энергии адронов в стволе подтверждает наличие узкой области изменения показателя γ в спектре первичного космического излучения при переходе от энергии $E_0 < 10^3$ ТэВ к $E_0 > 5 \cdot 10^3$ ТэВ на величину $\Delta\gamma \cong 0,4$. По приведенным здесь экспериментальным данным показатель γ увеличивается с $1,61 \pm 0,03$ до $2,07 \pm 0,06$. Изменение показателя $\Delta\gamma = 0,4 \pm 0,07$ заметно меньше величины $\Delta\gamma = 0,6 \pm 0,07$, приведенной в /9/.

2. Сравнение наблюдаемого спектра со спектром первичного космического излучения дает связь между энергией адронов в стволе ливня ϵ на глубине 690 г/см^2 атмосферы и энергией первичной частицы E_0 :

$$\epsilon(r \leq 3,5 \text{ м}) = 145 \cdot (E_0(\text{ТэВ})/2,5 \cdot 10^3)^{1,09 \pm 0,03} \text{ ТэВ.}$$

Используя соотношение из работы /8/

$$N_e = 1,1 \cdot 10^6 (E_0(\text{ТэВ})/2,5 \cdot 10^3)^{1,08 \pm 0,05},$$

можно подтвердить результат работы /5/ о пропорциональности между N_e и ϵ :

$$\epsilon(r \leq 3,5 \text{ м}) = 145 (N_e/1,1 \cdot 10^6)^{1,01 \pm 0,06} \text{ ТэВ.}$$

3. Флуктуации N_e и $\epsilon(\leq 3,5 \text{ м})$ на уровне 690 г/см^2 , по-видимому, не вносят существенных искажений в соотношения между средними значениями указанных величин и E_0 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Vernov S. N., Kristiansen G. B. Canad. J. Phys., 46, 187 (1965).
2. Никольский С. И. УФН, 78, 365 (1962).
3. Вавилов Ю. Н. и др. Труды ФИАН, 26, 7 (1964).
4. Асейкин В. С. и др. Изв. АН СССР, 46, 1012 (1976).
5. Асейкин В. С. и др. Препринт ФИАН № 178, М., 1981.
6. Аминова Т. П. и др. Труды ФИАН, 46, 157 (1970).
7. Никольский С. И., Стаменов Й. Н., Ушев С. З. ЖЭТФ, 87, 18 (1984).
8. Adamov D. S. et al. Proc. 18 th ICRC, 5, 275 (1983).
9. Христиансен Г. Б., Куликов Г. В., Фомин Ю. А. Космическое излучение сверхвысоких энергий. М., Атомиздат, 1975.

Поступила в редакцию 16 июня 1987 г.