

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ АДРОНОВ В ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ
ЛИВНЯХ, ОБРАЗОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ СВЫШЕ 10^{14} эВ

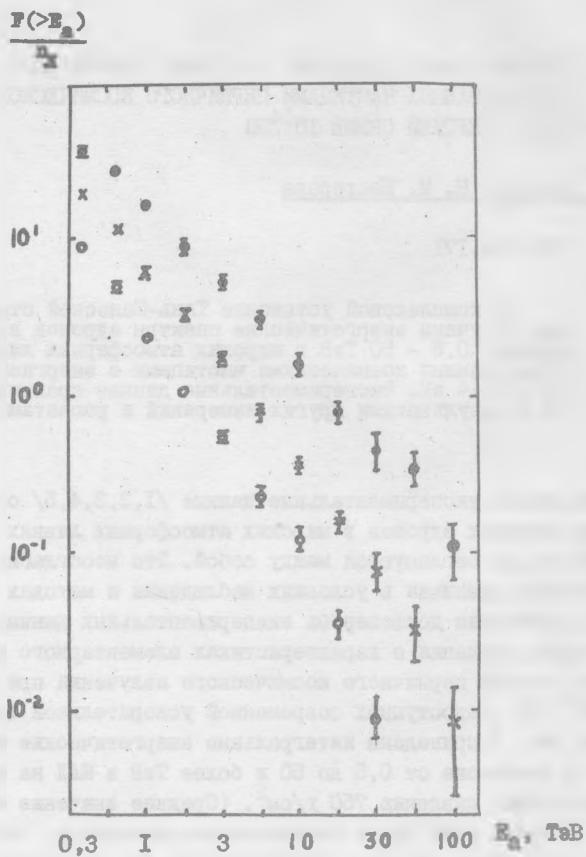
А. Г. Дубовый, Н. М. Нестерова

УДК 539.171

На комплексной установке Тянь-Шаньской станции получены энергетические спектры адронов в диапазоне 0,5 – 50 ТэВ в широких атмосферных ливнях, образованных космическими частицами с энергией $\geq 2 \cdot 10^{14}$ эВ. Экспериментальные данные сравниваются с результатами других измерений и расчетами.

Различные экспериментальные данные /1,2,3,4,5/ об энергетических спектрах адронов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) на уровне гор не согласуются между собой. Это несогласие является результатом различия в условиях наблюдения и методах измерения. Однако сравнение достоверных экспериментальных данных с расчетами может дать сведения о характеристиках элементарного акта и химическом составе первичного космического излучения при энергиях $> 10^{14}$ эВ, недоступных современной ускорительной технике.

На рис. 1 приведены интегральные энергетические спектры адронов в диапазоне от 0,5 до 50 и более ТэВ в ШАЛ на высоте, соответствующей давлению 750 г/см^2 . (Среднее значение зенитного угла θ наклона осей ШАЛ в исследованном интервале $\langle \theta \rangle = 22^\circ$). Спектры получены для трех интервалов по числу электронов N_e со средними значениями $\langle N_e \rangle_1 = 1,9 \cdot 10^5$; $\langle N_e \rangle_2 = 4,7 \cdot 10^5$ и $\langle N_e \rangle_3 = 2 \cdot 10^6$. Как видно из рис. 1, наклон спектров уменьшается с ростом N_e . Если эти спектры в диапазоне энергий от 0,5 до 10 ТэВ аппроксимировать степенным законом с показателем γ_a , то $\gamma_{a1} = 1,4 \pm 0,05$, а $\gamma_{a3} = 1,05 \pm 0,08$. Зависимость числа адронов с $E \gg 1$ ТэВ от N_e можно описать законом $n_a (> 1 \text{ ТэВ}) \sim N_e^\alpha$, где $\alpha = 0,85 \pm 0,05$ в диапазоне $N_e = 2 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^6$. С увеличением энер-



Р и с. I. Интегральные энергетические спектры адронов в ШАЛ для разных интервалов по N_0 : белые кружки - $\langle N_0 \rangle_1 = 1,9 \cdot 10^5$; крестики - $\langle N_0 \rangle_2 = 4,7 \cdot 10^5$; черные кружки - $\langle N_0 \rangle_3 = 2 \cdot 10^6$; n_x - число ШАЛ в данном интервале N_0 .

гии адронов величина показателя α возрастает. На такую тенденцию изменения вида спектра адронов указывают расчеты. Однако, малое значение γ_a при $N_e \geq 10^6$ может быть отчасти обусловлено расположением отдельных струй адронов, так как среднее число струй, регистрируемых калориметром, равно 10,8 на ливень с $N_e \geq 10^6$, если ось ШАЛ прошла через поверхность калориметра. Показатель спектра адронов в ливнях с $\langle N_e \rangle = 1,9 \cdot 10^5$ при энергиях больших 10 - 20 ТэВ резко возрастает. Такой излом спектра можно объяснить тем, что эта область энергий становится сравнимой с энергией первичных частиц, генерировавших ШАЛ, и свидетельствует в пользу "смешанного" химического состава первичных частиц без существенной доли тяжелых ядер.

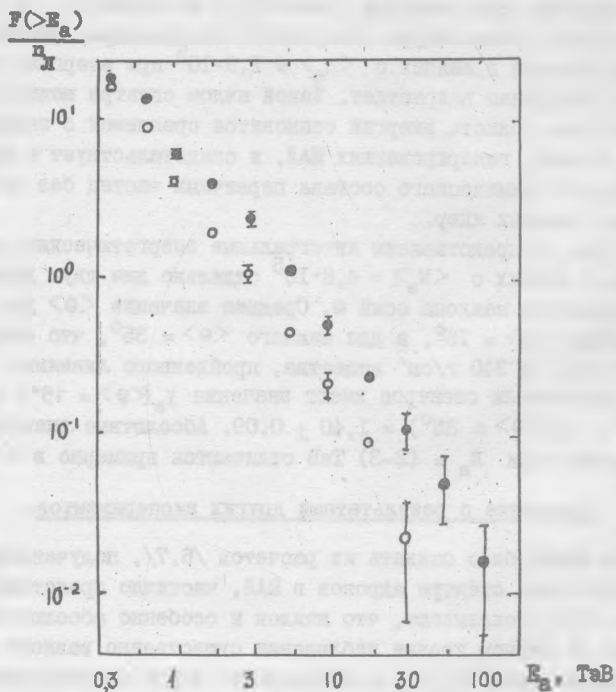
На рис. 2 представлены интегральные энергетические спектры адронов в ливнях с $\langle N_e \rangle = 4,8 \cdot 10^5$ отдельно для двух диапазонов зенитных углов наклона осей θ . Среднее значение $\langle \theta \rangle$ для верхнего спектра $\langle \theta \rangle = 15^\circ$, а для нижнего $\langle \theta \rangle = 35^\circ$, что соответствует 720 г/см² и 840 г/см² вещества, пройденного ливнями в атмосфере. Показатели спектров имеют значения $\gamma_a(\langle \theta \rangle = 15^\circ) = 1,25 \pm 0,07$ и $\gamma_a(\langle \theta \rangle = 35^\circ) = 1,40 \pm 0,09$. Абсолютные значения потоков адронов при $E_a = (2-3)$ ТэВ отличаются примерно в 2 раза.

Сравнение с результатами других экспериментов.

Как можно было ожидать из расчетов /6,7/, полученные нами энергетические спектры адронов в ШАЛ, частично представленные на рис. 1,2, показывают, что наклон и особенно абсолютное число адронов на данном уровне наблюдения существенно зависят от характеристик ливня N_e , θ , S. Расхождение между результатами различных экспериментов частично может быть объяснено тем, что рассматривались разные по N_e , θ и т.д. группы ливней на разных уровнях наблюдения.

На рис. 3 вместе с нашими данными о спектре адронов в ШАЛ с $\langle N_e \rangle = 4,8 \cdot 10^5$ и $\langle \theta \rangle = 15^\circ$ представлены данные ряда работ по спектрам адронов на уровне гор /2,3,5/, приведенные нами к тем же условиям путем пересчета. Как видно из рис. 3, спектры адронов, полученные в работах /2,3/, существенно отличаются от наших, как по абсолютной величине, так и по наклону. Такое различие между результатами экспериментов может быть объяснено разными методами измерений, в первую очередь адронной компоненты, а также и

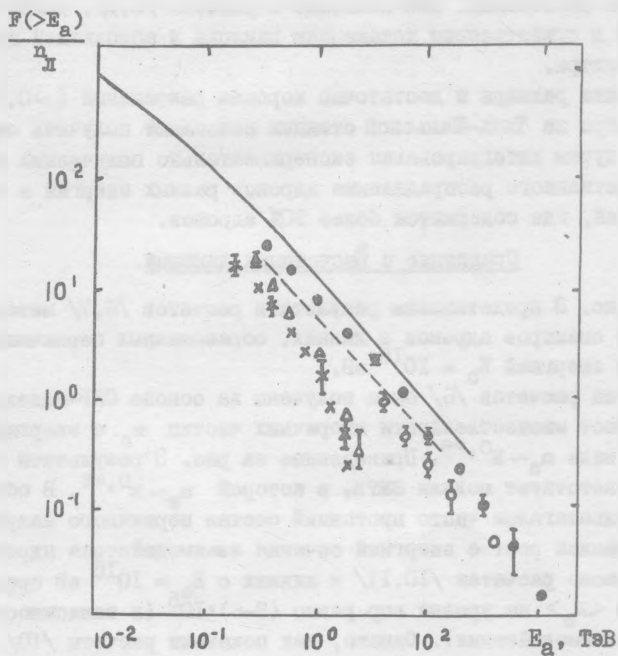
электронной компоненты ШАЛ. В работах /2,3/ адронная компонента измерялась с помощью "толчковой" методики. Ошибки определения



Р и с. 2. Интегральные энергетические спектры адронов в ШАЛ с $\langle N_0 \rangle = 4,7 \cdot 10^5$ для двух диапазонов зенитных углов θ наклона осей: белые кружки - $\langle \theta \rangle = 35^\circ$; черные кружки - $\langle \theta \rangle = 15^\circ$

энергии этим методом могут достигать ~ 2 раз. В нашем эксперименте и в работах /1,5/ энергия адронов измерялась calorиметрическим методом, где точность определения энергии существенно выше. Результаты работ /1,5/ близки к нашим.

Были проанализированы факторы, вносящие вклад в ошибку измерения энергии адронов нашим калориметром. Оценки /8/ показали, что средняя суммарная ошибка при определении энергии струи адронов меньше 20%. Для адронов с энергией 0,3 - 1,0 ТэВ, выделенной



Р и с. 3. Интегральные энергетические спектры адронов в ШАЛ. Все экспериментальные данные приведены к $N_0 = 4,7 \cdot 10^{15}$ и $\theta = 15^\circ$: x - /2/, Δ - /3/, o - /5/, • - настоящий эксперимент; расчеты для $E_0 = 10^{15}$ и $\theta = 0$: пунктирная линия - /7/; сплошная линия - /8/

в калориметре, вводилась поправка на долю энергии, лежащую ниже порога регистрации ионизации в камерах.

С другой стороны, разница между данными может получаться из-за различия в методах обработки. В работах /2,3/ число адронов

было получено следующим способом: экспериментальные функции пространственного распределения адронов с энергией выше заданной аппроксимировались законом $\rho_a(R) \sim \exp(R/R_0)$. Затем проводилось интегрирование аппроксимаций, справедливых лишь в исследованном интервале расстояний. Как показано в работах /8,9/, такой путь приводит к существенным искажениям наклона и абсолютной интенсивности спектра.

Большие размеры и достаточно хорошее разрешение ($\sim 0,25$ м) calorиметра на Тянь-Шаньской станции позволяют получить спектры адронов путем интегрирования экспериментально полученных функций пространственного распределения адронов разных энергий в области расстояний, где содержится более 90% адронов.

Сравнение с расчетными данными.

На рис. 3 представлены результаты расчетов /6,7/ методом Монте-Карло спектров адронов в ливнях, образованных первичными протонами с энергией $E_0 = 10^{15}$ эВ.

Данные расчетов /6/ были получены на основе СКР-модели с изобарой. Рост множественности вторичных частиц n_s с энергией принимался в виде $n_s \sim E^{0,25}$. Приведенные на рис. 3 результаты расчета /7/ соответствуют модели SMFB, в которой $n_s \sim E^{0,44}$. В обоих случаях предполагался чисто протонный состав первичного излучения и не учитывался рост с энергией сечения взаимодействия адронов.

Согласно расчетам /10,11/ в ливнях с $E_0 = 10^{15}$ эВ среднее значение $\langle N_0 \rangle$ на уровне гор равно $(3-6) \cdot 10^5$ (в зависимости от модели взаимодействия). Однако, как показали расчеты /10/, число адронов при отборе ливней с данным N_0 на уровне гор примерно в 1,2 раза меньше, чем при соответствующем E_0 в диапазоне $N_0 = 10^5 + 10^6$. Это надо учитывать при сравнении эксперимента с расчетами при $E_0 = \text{const}$.

В работе /9/ было показано, что энергия стр. и адронов, измеренная нашим calorиметром на глубинах ниже 150 г/см^2 , равна энергии адрона, генерировавшего эту струю в последнем взаимодействии над установкой. В связи с этим наши результаты следовало бы отнести к высоте на $\lambda_{вз} \sim 90 \text{ г/см}^2$ выше. По расчетам число адронов на этой высоте должно быть приблизительно в 1,3 раза больше. Но отличие эксперимента, когда выбираются события в определенных интервалах по N_0 и θ ($\langle \theta \rangle \neq 0$), от расчетов для $E_0 = \text{const}$ и $\theta = 0$

компенсирует это увеличение, что дает возможность сравнивать непосредственно наши экспериментальные данные для ливней с $\langle N_0 \rangle = 4,7 \cdot 10^5$ и $\langle \theta \rangle = 15^\circ$ с расчетными спектрами адронов на уровне 700 г/см^2 для $E_0 = 10^{15}$ эВ.

Полученный экспериментально спектр имеет несколько меньшее число адронов, чем расчетный (примерно в 1,5 раза). Это можно ожидать, если учесть, что сечение взаимодействия адронов растет с ростом энергии и химический состав первичного космического излучения сложный.

Учитывая некоторую неопределенность перехода от энергии струи, измеренной экспериментально, к энергии адрона, а также некоторую неоднозначность расчетов (в частности, перехода от E_0 к N_0), можно заключить, что наши данные допускают несколько более быстрый рост множественности вторичных частиц с энергией по сравнению с $n_s \sim E^{0,25}$.

Поступила в редакцию
7 июня 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. O. J. Dovzhenko, G. T. Zatsepin et. al., Proc. 6 ICRC (Moscow), 2, 144 (1959).
2. S. Miyake, K. Hinotani et. al., Acta Hung. 29, Suppl. 3,461 (1970).
3. Б. Воехм., Proc. 15th ICRC (Plovdiv), 8, 29 (1977).
4. R. H. Vatcha, B. V. Sreekantan. Proc. 13th ICRC (Denver), 4, 2625 (1973).
5. Р. А. Нымник, Диссертация, МГУ, 1967 г.
6. Д. А. Фомин, Диссертация, МГУ, 1972 г.
7. К. Ф. Grieder. Proc. 15th ICRC (Plovdiv), 8, 381 (1977).
8. В. А. Ромахин, Диссертация, ФИАН, 1976 г.
9. V. A. Romakhin, N. M. Nesterova et. al., Proc. 15th ICRC (Plovdiv), 8, 107 (1977).
10. J. Kempa, Nuovo Cim., 31, 568 (1976).
11. T. Shibata, Proc. 15th ICRC (Plovdiv), 8, 358 (1977).