

О РАЗВИТИИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ПО ДАННЫМ
ИЗМЕРЕНИЙ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА НА РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТАХ
В АТМОСФЕРЕ.

И. П. Иваненко ^{ж)}, А. Н. Квашнин, В. В. Макаров ^{ж)},
В. И. Рубцов, Л. А. Хейн ^{ж)}

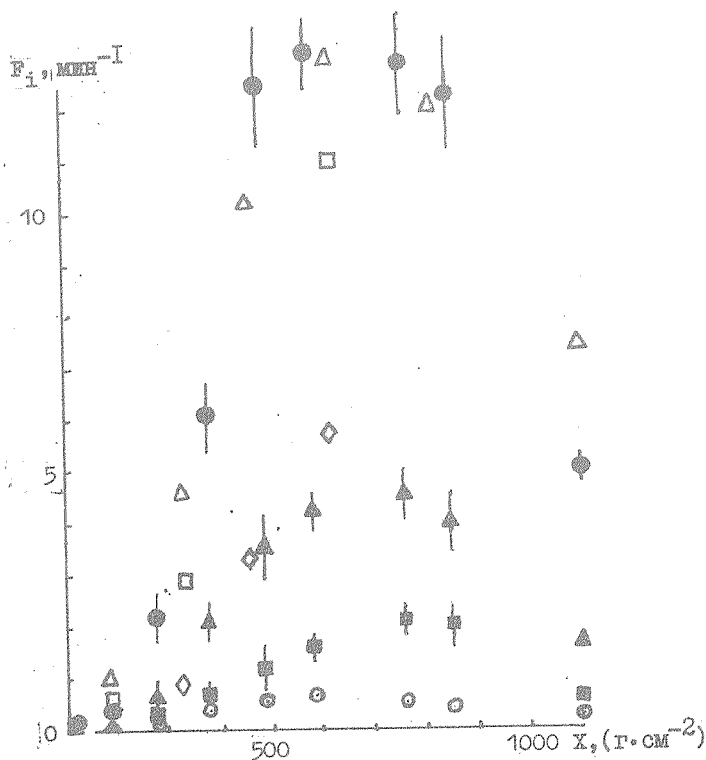
УДК 537.591

Приводятся результаты измерений спектра амплитуд импульсов черенковского света ШАЛ в атмосфере до высот ≈ 17 км. Регистрировался черенковский свет с пороговыми плотностями от 3 до 96 фот/см² (энергии первичных космических лучей $E_0 \approx 5 \cdot 10^{13}$ эВ). Проводится сравнение экспериментальных данных с расчетными.

Осенью 1979 года было проведено два подъема в стратосферу прибора для регистрации черенковского света, сопровождающего ШАЛ. Эксперимент был нацелен на изучение начальной стадии развития ШАЛ. Прибор состоял из трех параболических зеркал с диаметром 600 мм и фокусным расстоянием 240 мм. Оптические оси зеркал были направлены параллельно друг другу и наклонены под углом 30° к вертикали. В оптическом фокусе каждого зеркала устанавливался фотокатод фотоумножителя ФЭУ-49. Импульсы анодных токов ФЭУ после усилителей со временем формирования $\tau = 1,5 \cdot 10^{-7}$ с подавались на входы амплитудных дискриминаторов. Для каждого фотоумножителя имелось семь дискриминаторов с пороговыми значениями, которые соответствовали падению на зеркало черенковского света с плотностями $\rho_1 = 1,5$ фот/см², $\rho_2 = 3$, $\rho_3 = 6$, $\rho_4 = 12$, $\rho_5 = 24$, $\rho_6 = 48$ и $\rho_7 = 96$ фот/см² в интервале длин волн от $\lambda \approx 3000$ Å до $\lambda \approx 8000$ Å. Эти значения

^{ж)} НИИЯФ МГУ.

были определены с помощью вспышек черенковского света, вызываемых прохождением μ -мезонов космических лучей через пластину оргстекла, приставленную к фотокатодам ФЭУ. Импульсы от дискриминаторов, с одинаковыми порогами подавались на схему тройных совпадений с $\tau \approx 2 \cdot 10^{-7}$ с. Регистрировался темп счета тройных совпадений F_1 - событий, в которых на каждое зеркало падал поток фотонов с плотностью $\geq \rho_1$. Значения $\rho_1 = 1,5$ фот/см² выбрано так, чтобы в F_1 заметный вклад давали фоновые импульсы



Р и с. 1. Изменение темпа счета прибора F_1 при подъеме в атмосферу от земли до 17 км. Эксперимент: ϕ - $\rho_2 \geq 3$ фот/см²; $\uparrow$ - $\rho_3 \geq 6$ фот/см²; $\#$ - $\rho_4 \geq 12$ фот/см²; ϕ - $\rho_5 \geq 24$ фот/см². Расчет для $\rho_2 \geq 3$ фот/см²: Δ - $\alpha = 0,05$, $\beta = 0,5$; $\square$ - $\alpha = 0,03$, $\beta = 0,5$; $\diamond$ - $\sigma = \text{const}$, $n_s \propto \ln E$.

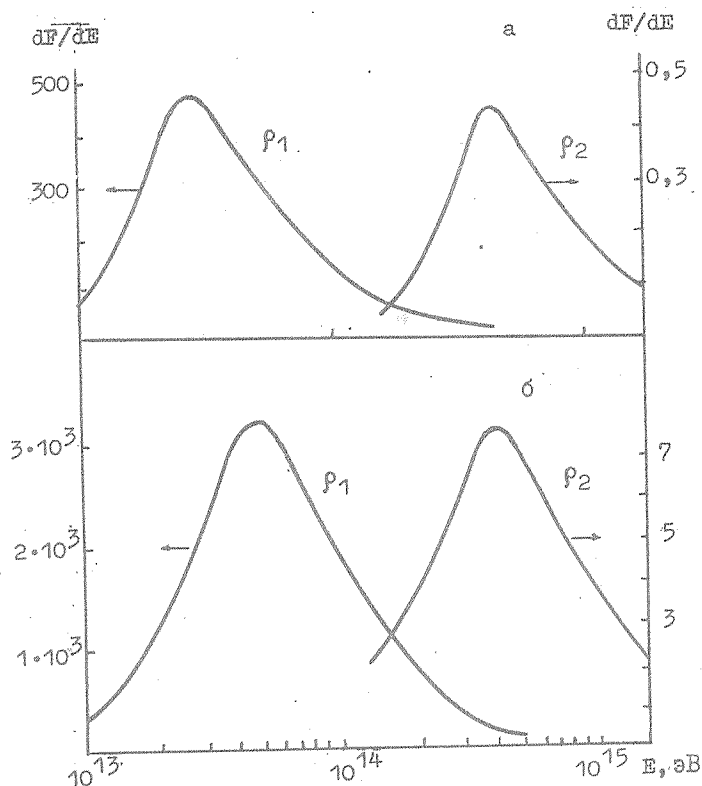
от света ночного неба. В полетах величина F_1 менялась слабо, что указывало на стабильность работы прибора. В обоих полетах значения F_1 в пределах статистической точности совпадают на одинаковых высотах и на подъеме и на спуске. Вклад фона ночного неба в $F_2 - F_7$ мал, так как эти значения на высотах ≈ 17 км практически равны нулю. Полученные в полетах результаты представлены на рис. 1, где приведены экспериментальные значения темпа счета событий F_1 с плотностями черенковского света $\gg \rho_1$ на разных глубинах в атмосфере.

Проведены расчеты пространственного распределения черенковского света ШАЛ от первичных протонов с энергией 10^{13} , 10^{15} , 10^{17} эВ для различных уровней наблюдения в атмосфере для двух моделей, предполагающих следующие зависимости сечения ядерного взаимодействия и множественности от энергии: 1) $\sigma = \sigma_0(1 + \alpha \ln E)$, $n_s \sim E^{\beta}$ и 2) $\sigma = \text{const}$, $n_s \sim \ln E$. Расчеты проведены для $\alpha = 0,05$, $\alpha = 0,03$ и $\beta = 0,5$ /1/.

На рис. 1 кроме экспериментальных значений темпа счета F_1 приведены также и рассчитанные значения. В расчетах использовался первичный спектр из /2/. Надо заметить, что использованную в расчетах величину телесного угла прибора $\Omega = 0,035$ ср. необходимо уточнить экспериментально. Для $\rho > 3$ фот/см² эксперимент довольно близок к расчету при $\alpha = 0,05$ и $\beta = 0,5$. Для больших пороговых плотностей экспериментальные величины F_1 несколько больше расчетных — экспериментальный спектр плотностей более жесткий, чем расчетный. Это указывает на более сильное, чем предсказывают модели, изменение характера акта ядерного взаимодействия с увеличением энергии.

На рис. 2 приведены рассчитанные распределения dF/dE — темпа счета прибора событий с данной пороговой плотностью, вызванных ШАЛ с заданной энергией E . Распределения получены для модели с $\alpha = 0,05$, $\beta = 0,5$ на высотах $H_1 = 13$ км, $H_2 = 3,6$ км и для двух пороговых плотностей: $\rho = 2$ фот/см² и $\rho = 20$ фот/см². По таким распределениям можно оценить область энергий первичных космических лучей, которые вносят эффективный вклад в темп счета прибора при данной пороговой плотности.

Проведенные расчеты показали также, что функция пространственного распределения фотонов черенковского света ШАЛ слабо зависит от энергии первичного протона, образующего ШАЛ. В этом



Р и с. 2. Вклад ШАЛ с данной энергией в темп счета прибора для $\rho_1 = 2$ фот/см² и $\rho_2 = 20$ фот/см² на высотах а) 3,6 км, б) 13 км

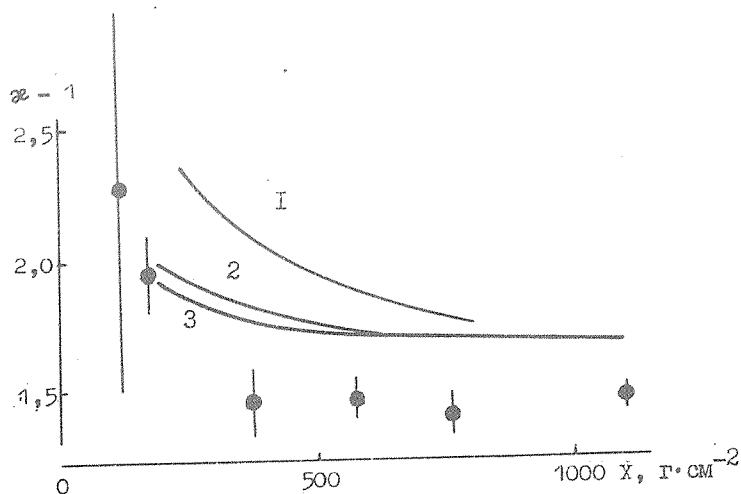
случае простые вычисления приводят к следующему выражению для спектра плотностей черенковского света ШАЛ

$$\frac{dF}{d\rho} = \frac{Ak(\gamma-1)/n}{n} \rho^{-(\gamma-1+n)/n} \int_0^{\infty} f(r)(\gamma-1)/n \cdot 2\pi r dr$$

или

$$F_{\geq \rho} \sim \rho^{-(\gamma-1)/n} = \rho^{-(\alpha-1)}, \quad (I)$$

где $dJ/dE = A E^{-\alpha}$ — спектр первичного космического излучения, $Q = k E^{\beta}$ — связь полного потока черенковского света ШАЛ с первичной энергией, $f(r)$ — функция пространственного распределения черенковского света. В выражение (I) входит единственный параметр n . В области максимума развития лавин и на больших глубинах в атмосфере $n \approx 1$ при различных моделях ядерного взаимодействия. На малых глубинах величина параметра n должна иметь сильную зависимость от характеристик ядерного взаимодействия.



Р и с. 3. Высотная зависимость показателя степени спектра плотностей черенковского света ШАЛ. $\bullet$ — эксперимент; расчет: 1 — $\alpha = 0,05$, $\beta = 0,5$; 2 — $\alpha = 0,03$, $\beta = 0,5$; 3 — $\sigma = \text{const}$, $n \propto \ln E$

На рис. 3 приведены экспериментальные и рассчитанные значения показателя степенного спектра плотностей черенковского света ШАЛ $\alpha - 1$. Как и следует ожидать из (I), расчетные значения $\alpha - 1$ на больших глубинах стремятся к $\gamma - 1 \approx 1,7$, т.е. к показателю степенного энергетического спектра первичных космических лучей. Так как, согласно экспериментальным данным, $\alpha - 1 \approx 1,7$ уже на глубине $x = 260 \text{ г/см}^2$, можно сделать заключение

#37

о том, что ШАЛ развиваются быстрее, чем предсказывают модели, заложенные в расчет. Более того, так как экспериментальная величина α — стремится к 1,5 с увеличением глубины, величина n становится несколько больше, чем 1. Это говорит о том, что с увеличением энергии первичных частиц увеличивается доля энергии, переходящая в черенковское излучение.

В заключение следует отметить, что в проведенных расчетах не учитывались флуктуации в развитии ШАЛ и ядерный состав первичных космических лучей. В дальнейшем планируется проведение расчетов с учетом указанных факторов и дополнительных полетов для увеличения статистики.

Поступила в редакцию
17 апреля 1981 г.

Л и т е р а т у р а

1. И. П. Иваненко, Б. Л. Каневский, Т. М. Роганова, ЯФ, 29, 694 (1979).
2. С. И. Никольский, Изв. АН СССР, сер. физ., 39, 1160 (1975).