

цы, растёт с энергией. При предельно высоких энергиях ($\mathcal{E}_0 \geq 10^{11}$ ГэВ) ливень покрывает площадь в сотни км².

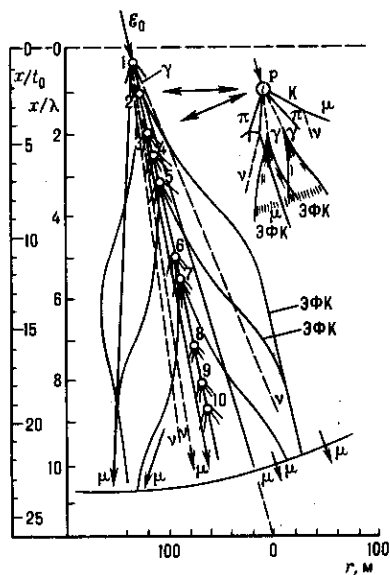


Рис. 2. Ядерный каскад в атмосфере. Цифрами показаны точки последовательных взаимодействий адрона высокой энергии; ЭФК — электронно-фотонный каскад, t_0 — радиационная единица длины.

Пространственные характеристики ливня изучаются в ф-ции расстояния от оси ливня r , выраженного в моллеровских единицах $x=r/r_0$. Напр., плотность частиц $\rho_e(x) = (N_e/r_0^2) f_e(x)$, где N_e — число частиц (электронов) в ливне на уровне наблюдения, $f_e(x)$ — нормированная ф-ция пространственного распределения, не зависящая от числа частиц N_e . Каскадная теория приводит к зависимости

$$\rho_e(x) = (N_e/r_0^2) C(s) x^{s-2.15} (x+1)^{s-4.5}, \quad (1)$$

где s — параметр, характеризующий «возраст ливня», $C(s)$ меняется от 0,16 до 0,4 при изменении s от 0,5 до 1,5. Особенностью теории, учитывающей пространственное распределение частиц (а не только продольное развитие ливня), является рост s при уменьшении x . При $s \rightarrow 2$ плотность частиц перестаёт меняться с расстоянием. Область, где существует такой режим ($r \leq 1$ м), наз. стволом ливня.

Сравнение теории с экспериментом позволяет определить s . Каждый из детекторов Д на рис. 3 измеряет плот-

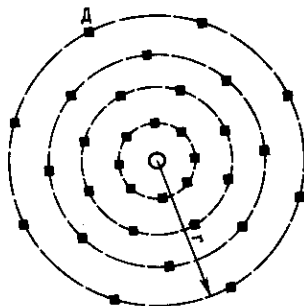


Рис. 3. Круговая установка для регистрации электронной компоненты ливня; ■ — сцинтилляционные детекторы или группы годоскопических счётчиков.

ность частиц и время прихода фронта ливня с точностью до нс. Распределение плотности частиц определяет положение максимума плотности, т. е. оси ливня, а по времени запаздывания прихода фронта в разные детекторы вычисляется угол θ наклона оси. При этом оказалось, что s составляет 1,2 на уровне моря и 1,1 на высоте гор. Столь слабая зависимость s от глубины — следствие электронно-

ядерной природы каскада. Адроны высокой энергии, идущие в стволе, всё время подпитывают ливень и замедляют его «старение». На ядерные процессы указывает и медленное поглощение электронов ливня в атмосфере. В глубине атмосферы электроны Ш. а. л. движутся в равновесии с адронами.

Зная распределение плотностей частиц в установке и предполагая осевую симметрию ливня, можно найти полное число частиц (электронов) в ливне на уровне наблюдения:

$$N_e = 2\pi \int \rho_e(r) r dr. \quad (2)$$

Можно также построить спектр ливней по числу частиц $K(N_e, x)$ на разных глубинах x уровня наблюдения в атмосфере (рис. 4). На уровне моря этот спектр имеет вид $K = 2 \cdot 10^{-10} (N_e/10^6)^{-1.5 \pm 0.07} (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}$, $10^4 < N_e < 10^6$,

$$K = 6,3 \cdot 10^{-12} (N_e/10^6)^{-2.0 \pm 0.07} (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}, \quad N_e > 10^6.$$

Эта зависимость установлена до $N_e \sim 10^7$.

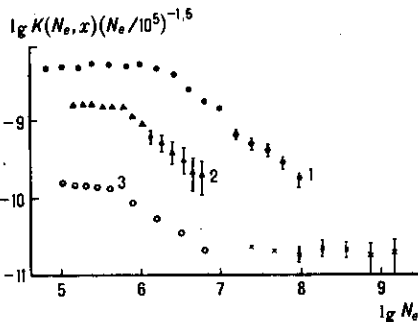


Рис. 4. Спектры ливней по числу частиц на различных глубинах в атмосфере: 1) $x=500$ г/см², 2) $x=700$ г/см², 3) $x=1000$ г/см² (уровень моря).

Используя модельные расчёты продольного развития ядерного каскада в атмосфере и измеренное число электронов N_e , можно оценить энергию первичной частицы, вызвавшей ливень. В случае чистого электронно-фотонного каскада это возможно. Однако в электронно-ядерном ливне существуют значит. колебания числа частиц (при фиксир. энергии), вызванные флуктуациями глубины первого акта взаимодействия и доли энергии, передаваемой вторичным частицам. С учётом этих флуктуаций можно установить связь между N_e и ср. энергией \mathcal{E}_0 первичной частицы. Это позволило Г. Б. Христиансену с сотрудниками сделать вывод об изменении спектра первичного космич. излучения для энергий $\mathcal{E}_0 \sim 4 \cdot 10^6$ ГэВ.

Изучение Ш. а. л. ведётся с помощью комплексных установок, включающих систему детекторов для регистрации электронов, по распределению к-рых определяют положение оси Ш. а. л., угла её наклона θ , числа частиц. Др. система детекторов служит для измерения адронной и мюонной компонент, а также для регистрации черенковского свечения атмосферы под воздействием Ш. а. л. (рис. 5). Измеряется не только число частиц разного сорта, но и их энергия и пространственное распределение. Электроны макс. энергии сосредоточены вблизи оси, где их ср. энергия $\mathcal{E}_e = 5$ ГэВ, а их ср. энергия по всему ливню 0,2 ГэВ. Поэтому полная энергия электронно-фотонной компоненты на уровне моря $\mathcal{E}_{\text{эф}} = 0,2 N_e$ ГэВ. Адроны высокой энергии ($\mathcal{E}_a \sim 10^3$ ГэВ) сосредоточены в стволе Ш. а. л. на расстоянии 1—2 м от оси. Их свойства изучают с помощью ионизационных калориметров, фотоэмульсионных и рентгеноэмульсионных камер. Число адронов с $\mathcal{E}_a > 1$ ГэВ не превышает 1% от числа электронов, а суммарная энергия примерно равна энергии электронно-фотонной компоненты ($\mathcal{E}_{\text{аа}} = 0,15 N_e$ ГэВ). Эта энергия обеспечивает непрерывную подпитку электронно-фотонного каскада.