

Рис. 3. Влияние переходных эффектов в слоистом веществе (Pb — пластик П): 1 — каскадная кривая в однородном поглотителе из Pb; 2 — каскадная кривая в слоистой среде.

корреляций увеличивает флуктуации. На рис. 4 представлена зависимость относит. дисперсии от глубины, полученная в экспериментах с космич. лучами.

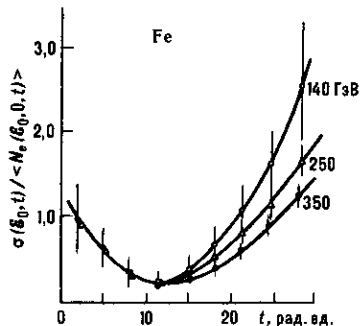


Рис. 4. Флуктуации электронно-фотонных каскадов при разных  $\mathcal{E}_0$  в Fe.

Лит.: Беленький С. З., Лавинные процессы в космических лучах, М.—Л., 1948; Росси Б., Частицы больших энергий, пер. с англ., М., 1955; Мигдал А. Б., Тормозное излучение и образование пар при больших энергиях в конденсированной среде, «ЖЭТФ», 1957, т. 32, с. 633; Иваненко И. П., Электромагнитные каскадные процессы, М., 1972; Иваненко И. П., Рогонова Т. М., Каскадные ливни, вызываемые частицами сверхвысоких энергий, М., 1983.

В. С. Мурзин.

**ЭЛЕКТРОННО-ЯДЕРНЫЕ ЛИВНИ** (проникающие ливни, мезонные ливни, струи, звёзды) — поток генетически связанных адронов и электронов, возникающий в результате взаимодействия адрона или лептона высокой энергии ( $\mathcal{E} > 10^9$  эВ) с нуклонами или ядрами. Открыты в 40-х гг. 20 в. при изучении взаимодействий космич. частиц с ядрами с помощью Вильсона камеры и ядерных фотографических эмульсий. Детально изучены в экспериментах на ускорителях заряженных частиц с помощью электронных детекторов и пузырьковых камер (рис. 1).

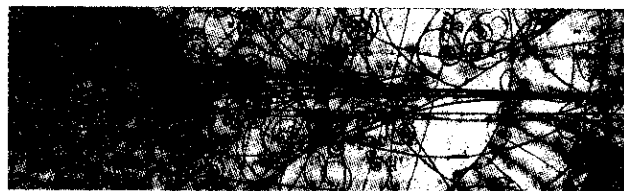


Рис. 1. Электронно-ядерный ливень, зарегистрированный в пузырьковой камере. Стрелкой отмечено начало ливня.

В результате взаимодействия адронов с нуклонами или ядрами происходит множественное рождение мезонов (если энергия столкновения достаточна), в т. ч. нейтральных пи-мезонов, η-мезонов и др., распадающихся с испусканием фотонов практически в точке взаимодействия. Фотоны сравнительно быстро конвертируются в электрон-позитронную пару и дают начало электронно-фотонному ливню. Т. о., в результате взаимодействия наряду с мезонами (проникающая компонента) появляются электроны и фо-

тоны (смешанный ливень). При очень высоких энергиях ( $> 1$  ТэВ) рождённые частицы вылетают в виде узкого пучка — струи. Сечение образования Э.-я. л. (сечение неупругого взаимодействия)  $\sigma$  близко к геометр. сечению нуклонов и ядер. При энергиях первичных частиц  $\mathcal{E}_0 > 30$  ГэВ сечения  $\sigma$  растут пропорционально  $\ln^2 \mathcal{E}_0$ . В протон-протонных столкновениях в интервале энергий от 30 до  $1,5 \cdot 10^5$  ГэВ сечение меняется от 30 до 55 мб. Для взаимодействия адронов с ядрами  $\sigma$  зависит от массового числа  $A$ :  $\sigma \sim A^\alpha$ , где  $\alpha \sim 0,7 \div 0,8$ .

Одной из важных особенностей Э.-я. л. является множественное рождение частиц (см. Множественные процессы), причём  $1/3$  от полного числа рождённых пионов составляют нейтральные пионы, дающие после распада начало электронно-фотонному каскаду.

Доля энергии, уносимая дочерними частицами, достигает в среднем в нуклон-нуклонных взаимодействиях 50%, причём 25—30% от этого значения составляет энергия нейтральных пионов  $\pi^0$ . Остальную энергию ( $\approx 50\%$ ) сохраняет частица той же природы, что и первичная, или близкая к ней по кварковому составу (напр., протон, нейтрон, гиперон, Δ-резонанс и др. в случае первичного протона). Такие частицы наз. лидирующими. Они имеют широкий спектр (рис. 2). Вызывая развитие электронно-ядер-

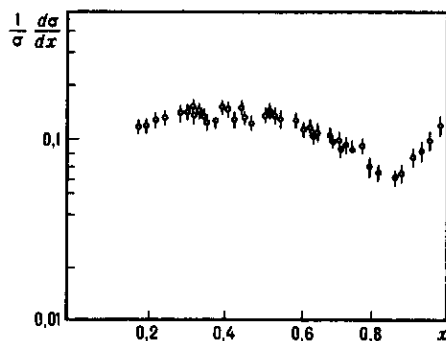


Рис. 2. Спектр лидирующих протонов в протон-протонном столкновении при энергии 200 ГэВ;  $x$  — отношение энергии лидирующего протона к энергии первичного протона.

ных каскадов в веществе, лидирующие частицы увеличивают проникающую способность адронов (рис. 3).

В атмосфере Земли Э.-я. л., создаваемые первичными космич. адронами, образуют все вторичные компоненты

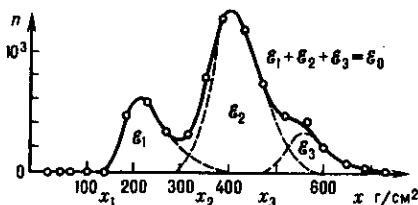


Рис. 3. Электронно-ядерный каскад, зарегистрированный в ионизационном калориметре из Fe, и его возможная интерпретация как цепь последовательных столкновений;  $x = \rho l$ , где  $l$  — толщина вещества в калориметре,  $\rho$  — плотность вещества. По оси ординат отложено число частиц (в основном электронов); энергия первичной частицы  $\mathcal{E} \sim 500$  ГэВ.

космич. лучей: электронно-фотонную из-за распада  $\pi^0$ , мюонную и нейтринную из-за распада заряж. пионов и каонов, адронную в результате переноса энергии в глубь атмосферы лидирующими частицами.

При энергиях выше  $10^6$  ГэВ космич. адроны рождают в атмосфере гигантские Э.-я. л., наз. широкими атмосферными ливнями. Теоретич. описание Э.-я. л. основано на кварковых, кварк-партоновых и др. моделях. Эти модели