

вызывают превращения встречающихся им на пути атомных ядер азота, кислорода и других элементов, что приводит к возникновению *вторичных частиц*. На высоте 14 км число вторичных частиц в космических лучах достигает максимума, а на меньших высотах быстро уменьшается, так как здесь происходит их интенсивное поглощение плотными слоями воздуха.

Часть вторичных космических лучей состоит из электронов, позитронов и фотонов, которые почти полностью задерживаются слоем свинца толщиной 10 см; эту часть называют *мягкой компонентой космических лучей*; другую, проходящую через указанный фильтр без существенного ослабления, — *жесткой компонентой*. На уровне моря космические лучи на $\frac{2}{3}$ состоят из жесткой компоненты, но на высоте 14 км, напротив, интенсивность мягкой компоненты более чем в 3 раза превышает интенсивность жесткой компоненты (рис. 370).

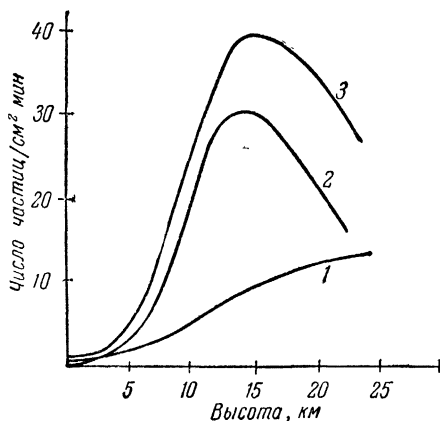


Рис. 370. Интенсивность жесткой компоненты (кривая 1), мягкой компоненты (кривая 2) и суммарная (кривая 3) космических лучей (для геомагнитной широты 50° N).

§ 97. Каскадное образование электронно-позитронных пар в космических лучах. Потери энергии электронами на тормозное излучение

В 1933—1935 гг. (т. е. в те же годы, когда Жолио-Кюри в своих опытах с радиоактивными лучами обнаружил возникновение электронно-позитронных пар; § 91) Росси и другие физики установили, что образование электронно-позитронных пар постоянно происходит в космических лучах. Оказалось, что в космических лучах этот процесс часто развивается *каскадно* (в особенности при поглощении космических лучей такими плотными веществами, как свинец): взаимодействие электрона и позитрона первой возникшей пары с веществом приводит к образованию новых электронно-позитронных пар, и, таким образом, число частиц стремительно нарастает — создается *электронно-позитронная лавина*.

Пролетая вблизи атомного ядра, электроны, позитроны и другие заряженные частицы испытывают изменение своей скорости по величине и направлению, а, как известно из электродинамики, заряд, движущийся ускоренно, должен излучать энергию. В результате

возникает так называемое *тормозное излучение* заряженных частиц в поле атомных ядер.

Фотоны тормозного излучения распространяются преимущественно в ту же сторону, в которую движутся быстрые частицы, породившие их. При столкновении с ядром атома электрон космических лучей в среднем около 70% своей энергии отдает на испускание тормозного γ -фотона.

При большой скорости движения электрона через вещество потеря его энергии на ионизацию весьма мала в сравнении с потерей энергии на излучение тормозных фотонов.

Если бы электрон расходовал энергию только на ионизацию среды, то при начальной энергии в 1000 Мэв он проходил бы слой свинца 10 см, утрачивая только 110 Мэв, и имел бы пробег в свинце около 90 см. Но вследствие тормозного излучения электрон с энергией 1000 Мэв задерживается слоем свинца не 90 см, а всего 9 см. На рис. 371 сопоставлены потери энергии на ионизацию и тормозное излучение.

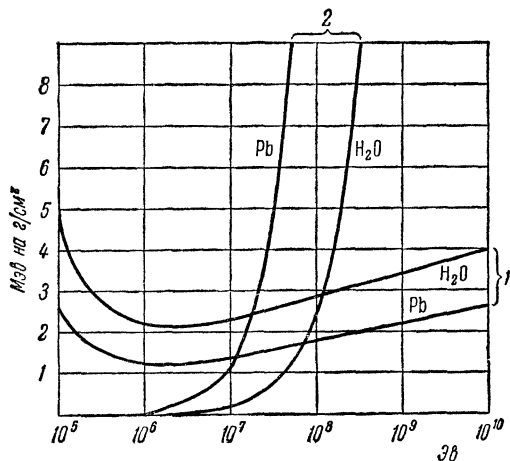


Рис. 371. Потеря энергии быстрыми электронами на ионизацию (1) и тормозное излучение (2).

Для других быстро движущихся заряженных частиц, например протонов, *потеря энергии на тормозное излучение* ничтожна, так как она, как показывают расчеты, *обратно пропорциональна квадрату массы движущейся частицы*. Поэтому при энергиях порядка нескольких тысяч Мэв протоны оказываются более проникающими частицами, чем электроны той же энергии.

Гамма-лучи тормозного излучения, распространяясь в атмосфере, поглощаются вследствие обычного фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электронно-позитронных пар. Какая форма поглощения преобладает, это зависит от энергии фотона.

На рис. 372 сплошной кривой показана зависимость коэффициента поглощения γ -лучей в свинце от энергии фотонов (отложенной в логарифмическом масштабе). Ординаты сплошной кривой равны сумме ординат трех пунктирных кривых, показывающих отдельно поглощение, вызываемое фотоэффектом, эффектом Комптона и образованием пар. Из рисунка видно, что поглощение фотонов, имеющих энергию, значительно меньшую $m_{\text{эл}}c^2$, происходит главным об-

разом вследствие производимого ими фотоэффекта; при $h\nu$, превосходящем $m_{эл}c^2$ в несколько раз, поглощение сводится преимущественно к комптоновскому рассеянию; при $h\nu$, в десятки и сотни раз превосходящем $2m_{эл}c^2$, поглощение фотонов почти исключительно обуславливается образованием пар.

Из сказанного ясно, что поглощение тормозных γ -фотонов с энергией в сотни мегаэлектронвольт должно происходить только путем образования пар.

Электроны и позитроны вторичного происхождения, порожденные γ -фотоном, проходя через вещество, снова испускают тормозные γ -фотоны, но уже с меньшей энергией. Эти тормозные фотоны в свою очередь порождают электронно-позитронные пары и т. д. Таким образом происходит процесс дробления энергии космических частиц и одновременно процесс мультипликации (умножения) числа электронов и позитронов в космических лучах (рис. 373).

Надо отметить, что указанное дробление начальной энергии электрона мало сказывается на значении его скорости: электроны с энергией 40 Мэв имеют скорость, отличающуюся от скорости света менее чем на одну сотую долю процента, а при энергии 115 Мэв скорость электрона отличается от скорости света только на одну тысячную долю процента.

Тормозное излучение и вероятность образования электронно-позитронной пары тем более велики, чем массивнее ядро, участвующее в этих процессах, а именно: *тормозное излучение и вероятность образования пары пропорциональны квадрату атомного номера ядра*. В связи с этим развитие нескольких каскадов электронно-позитронной лавины происходит: в воздухе — в слое толщиной в километры, а в свинце — в слое толщиной в сантиметры.

Вычисления показывают, что среднее расстояние l_0 , проходя которое электрон, столкнувшись с ядром, испускает тормозной фотон (уносящий, как уже упоминалось, 70% энергии электрона), составляет: для воздуха нормальной плотности 300 м, для воды 30 см, для алюминия 10 см и для свинца 0,5 см. Величину l_0 называют *радиационной длиной*; она обратно пропорциональна числу

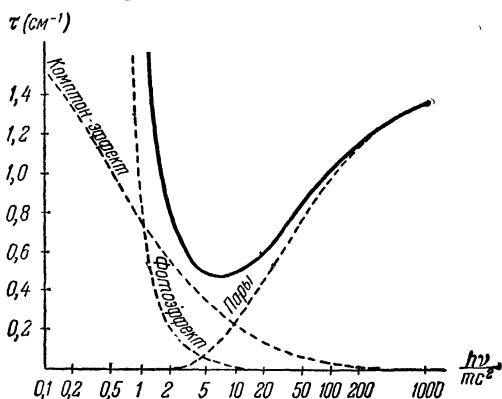


Рис. 372. Удельный вес эффекта Комптона, фотоэффекта и образования пар при поглощении энергии γ -фотонов в свинце.

На оси абсцисс отложены отношения энергии фотона $h\nu$ к величине $m_{эл}c^2$ в логарифмическом масштабе.

атомных ядер в 1 см^3 поглощающего вещества и обратно пропорциональна квадрату заряда этих ядер. Пролетев приблизительно то же самое расстояние l_0 , равное радиационной длине, фотон при столкновении с ядром (более чем в половине случаев, если энергия фотона достаточно велика) порождает электронно-позитронную пару.

По мере каскадного умножения электронов их энергия, а стало быть, и энергия тормозных фотонов быстро убывают. При уменьшении энергии фотонов до нескольких мегаэлектронвольт при поглощении в свинце вероятность эффекта Комптона становится (как показывает рис. 372) больше, чем вероятность образования пар. В связи с этим развитие лавины в свинце обрывается при энергии фотонов $6-7 \text{ Мэв}$.

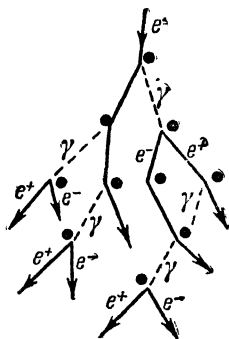


Рис. 373. Развитие электронно-позитронной лавины.

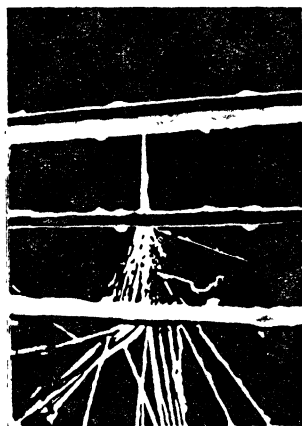


Рис. 374. Ионизационные следы каскадного ливня.

Для воздуха в диаграмме, аналогичной рис. 372, кривая образования пар поднимается менее круто; преобладание вероятности эффекта Комптона над вероятностью образования пар в воздухе наступает при энергиях, раз в десять больших, чем в свинце. Поэтому развитие электронно-позитронных лавин в воздухе обрывается быстрее, чем в свинце, — тогда, когда энергия электронов понижается до 70 Мэв . Тормозные фотоны, порождаемые электронами меньших энергий, уже сравнительно редко приводят к образованию пар, но продолжают обогащать мягкую компоненту космических лучей электронами, вырывающимися из электронных оболочек атомов, и электронами отдачи, возникающими при эффекте Комптона.

Таким образом, γ -фотон с энергией порядка 100 Мэв в свинце может породить в среднем трехкаскадную электронно-позитронную лавину, состоящую из полутора-двух десятков частиц. Но в воздухе фотон той же энергии вызовет образование в среднем всего одной, реже двух, электронно-позитронных пар. Многокаскадные электронно-позитронные лавины в воздухе могут создаваться только

электронами очень больших энергий — порядка многих сотен или тысяч мегаэлектронвольт.

Каскадное образование пар резко уменьшает проникающую способность сверхбыстрых электронов, в особенности в среде с тяжелыми ядрами, где вероятность образования пар велика и радиационная длина мала.

Для наблюдения процесса каскадного образования электронно-позитронных пар камеру Вильсона разделяют на несколько частей тонкими пластинками свинца толщиной от нескольких миллиметров (первые пластинки) до долей миллиметра (последние пластинки). Тогда электроны и позитроны, образованные в свинце и выброшенные в воздух, оставляют хорошо видимые ионизационные следы в промежутках между пластинками свинца. На рис. 374 показана одна из полученных таким образом фотографий каскадной электронно-позитронной лавины.

§ 98. μ-мезоны. Зависимость времени жизни неустойчивых частиц от скорости движения

Мезоны ¹⁾ — частицы с отрицательным и положительным зарядом, равным заряду электрона, со спином $\frac{1}{2}$ и с массой покоя, превосходящей приблизительно в 207 раз массу покоя электрона, — впервые были обнаружены в 1936 г. Андерсоном. Позже эти частицы получили название μ-мезонов (*мюонов*) в отличие от π-мезонов (*пионов*), открытых в 1948 г. Пууэллом, имеющих спин нуль и большую массу.

Андерсон обнаружил существование μ-мезонов, изучая состав жесткой компоненты космических лучей посредством камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле и разделенной на отсеки пластинками платины. В последующие годы этим методом было получено множество фотографий ионизационных следов мезонов с отрицательными и положительными зарядами: μ⁻-мезонов и μ⁺-мезонов. Рис. 375 воспроизводит одну из таких фотографий. Сильно искривленный след *e* на этой фотографии образован электроном; *d* — ионизационный след мезона. На подлинных фотографиях ионизационные следы частиц различной массы — электронов, мезонов, протонов — заметно отличаются шириной и структурой. Уже по виду ионизационных следов Андерсон мог заключить, что часть

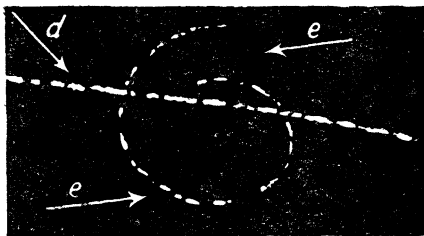


Рис. 375. Ионизационный след мезона (показан стрелкой *d*).

¹⁾ От греч. μέσος — средний.