Доклады Академии наук СССР
1955. Том 103, № 4

ФИЗИКА

И. Л. РОЗЕНТАЛЬ, М. Л. ТЕР-МИКАЭЛЯН и Е. Л. ФЕЙНБЕРГ

О ЛИВНЯХ ФОТОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

(Представлено академиком Д. В. Скобельцыным 18 IV 1955)

1. Недавно были опубликованы сообщения ([1],[2]) о том, что в трех случаях в фотоэмульсии, находящейся в стратосфере, наблюдались ливни, состоящие только из электронно-позитронных пар высокой энергии (10^8—10^{10} эв и выше). В каждом ливне на длине порядка 20 000—40 000 μ содержалось 12—16 пар и не содержалось никаких других

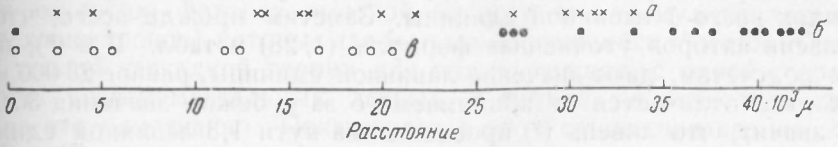


Рис. 1. Указано место возникновения каждой из зарегистрированных пар. По оси абсцисс отложено расстояние от края эмульсии (*а* — ливень из ([1])) либо от места возникновения первой пары (*в* — ливень I из ([2]) и *б* — ливень II из ([2])).

заряженных частиц. Угловые размеры ливней — порядка 10^{-3} радиана. В двух случаях ([2]) приведены минимальные оценки энергии всех частиц. Только в одном случае ([1]) первая пара возникла не в пластинке, а до вхождения в нее.

Авторы ([1]) истолковывают это явление как свидетельство того, что в пластинку входит ливень из 20 фотонов высокой энергии (суммарная энергия по их оценке $\sim 10^{13}$ — 10^{14} эв, для ([2]) суммарная энергия $\sim 10^{12}$ эв), которые и дают в фотоэмульсии пары. Загадочный характер процесса, который мог бы привести к возникновению подобного ливня фотонов, побудил авторов ([1]) выдвинуть гипотезу об аннигиляции частиц-античастиц.

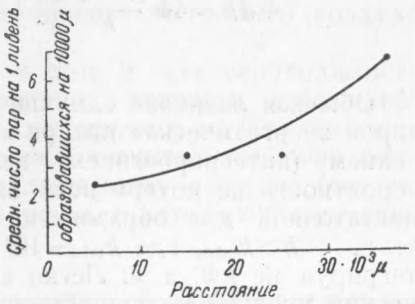


Рис. 2. Число пар, возникающих на 10 000 μ пути ливня, усредненное по всем трем ливням, как функция расстояния от начала ливня

2. Первый вопрос, который возникает при изучении данных ([1],[2])— это действительно ли в фотоэмульсию входит лавина фотонов? По данным ([1],[2]), где приведены расстояния от края пластинки или от места возникновения первой пары до мест возникновения остальных пар, мы построили рис. 1 и 2. На рис. 1 отмечены точки возникновения каждой пары в каждом из трех ливней, причем отсчет велся либо от места вхождения ливня в пластинку (ливень ([1])), либо от места возникновения первой пары (ливни ([2])). Уже из этого рисунка

ясно видно, что число возникающих на единицу пути ливня пар возрастает по мере продвижения ливня и, во всяком случае, не убывает. На рис. 2, исходя из усреднения данных всех трех ливней, показано число пар, возникающих на каждых 10 000 μ пути ливня (отнесенное к одному ливню). Кривая показывает, что число образующих пар нарастает по мере продвижения ливня. Между тем, если бы все фотоны, создающие пары, входили в эмульсию извне, кривые должны были бы экспоненциально убывать на длине порядка 1 лавинной единицы (~25 000 μ, см. ниже). (Если бы можно было полагаться на столь скудные в статистическом отношении данные, то можно было бы заметить, что вначале, после первых 5000 μ, число возникающих пар убывает, а затем начинает очень сильно возрастать; на кривой рис. 2 интервал усреднения преднамеренно выбран так, что это смазано.) Несмотря на разброс и плохую статистику, кажется несомненным вывод, что число фотонов нарастает по мере распространения в эмульсиях, т. е. что мы имеем процесс типа каскадного размножения. Число входящих в эмульсию фотонов заведомо по крайней мере в несколько раз меньше полного числа пар.

3. Какой процесс может вызвать это каскадное размножение? Авторы [1] считают, что ливень не может быть истолкован как простая электронно-фотонная лавина, поскольку вся длина ливня имеет порядок всего 1 лавинной единицы. Заметим прежде всего, что для эмульсии авторов уточненная формула (1, 28) и табл. II в [3], по нашим подсчетам, дают значение лавинной единицы, равное 25 000 μ, что несколько отличается от принимаемого за рубежом значения 35 000 μ. Это значит, что ливень [1] прослежен на пути 1,3 лавинной единицы, ливни [2] — на протяжении 0,8 и 1,7 единицы.

Вполне строгой и исчерпывающей теории лавинных процессов в фотоэмульсии не существует. Однако мы можем использовать ряд подсчетов и оценок.

Сечение образования тормозного фотона энергии k в случае электрона энергии E на ядре заряда Ze при полной экранировке равно [4]

$$\Phi\, dk = 4\bar{\Phi}\,\frac{E-k}{E}\,\frac{dk}{k}\left[\frac{E^2+(E-k)^2}{E(E-k)}-\frac{2}{3}\right]\ln\left(191Z^{-1/3}\right). \qquad (1)$$

Обычная лавинная единица длины определяется как длина, на которой энергетическая потеря имеет порядок E. Она получается усреднением (интегрированием) величины $k\Phi$ по k. Однако нам важна вероятность не потери всей энергии, а излучения кванта с энергией, достаточной для образования наблюдаемых в данных случаях пар, т. е. с $k > k_{\min}$, где $k_{\min} \sim 10^8$ эв [1,2]. Эту вероятность получим, интегрируя не $k\Phi$, а Φ. Легко видеть, что здесь возникает логарифмический множитель, существенно больший единицы. Именно,

$$\int_{k_{\min}}^{E} \Phi\, dk \approx \frac{16}{3}\,\bar{\Phi}\ln\frac{E}{k_{\min}}\ln\left(191Z^{-1/3}\right). \qquad (2)$$

По сравнению с сечением, определяющим лавинную единицу длины, здесь входит лишний множитель $\frac{4}{3}\ln\frac{E}{k_{\min}}$, равный ~ 10 при $\frac{E}{k_{\min}} = 100$ (что соответствует оценкам [2]).

Далее, существуют вычисления Арли [5] для развития лавины в свинце при начальных энергиях электрона $E_0 = \beta e^y$, $y = 2$; 4 и 6, где β — критическая энергия для свинца. Нас интересует лавина на

малых толщинах, где при больших E ионизационные потери еще несущественны. Поэтому мы можем попытаться перенести результаты Арли на случай фотоэмульсии, пренебрегая как тем, что здесь β больше, чем в свинце, так и тем, что в расчетах Арли ионизационные потери учтены некорректно (см. [3], стр. 92). В таком случае, учитывая, что в [5] лавинная единица определена несколько иначе, чем принято (лишний множитель $\ln 2$), из табл. XV в [5] для $y = 6$, т. е. для начальной энергии $E_0 \sim 5 \cdot 10^9$ эв на глубине 1 лавинной единицы ($\approx 1{,}4$ единиц Арли), вместо одного вошедшего электрона получаем 5—6 электронов. Для интересующей нас энергии $\sim 3 \cdot 10^{10}$ эв число электронов должно быть еще больше.

Отметим также, что подсчеты Баба и Чакрабарти [6] дают результаты, близкие к этим. Именно, для $E_0 \sim 3 \cdot 10^{10}$ эв на глубине 1 лавинной единицы получается около 10 частиц. Хотя эти вычисления по смыслу сделанных пренебрежений для малых толщин неточны, мы можем принять и эту цифру в качестве оценки.

Таким образом, участвующие в ливнях электроны возникающих пар способны мультиплицировать не на 25 000 μ, а на отрезках в 10 раз меньших. Для образования пар фотоном подобного эффекта „укорочения лавинной единицы" нет. Можно ли, однако, объяснить наблюдаемые случаи простым каскадным размножением, скажем, двух вошедших в эмульсию фотонов высокой энергии (т. е. мультипликацией четырех электронов), которые дал бы один распавшийся π^0-мезон? Отсутствие точной каскадной теории для малых толщин, с одной стороны, скудость экспериментальных данных, с другой, не позволяют ответить на это однозначно. Показателен в этом отношении все же „случай I" в [2], где две первые пары имеют суммарную минимальную энергию $1{,}1 \cdot 10^{11}$ эв, а все остальные 10 пар возникают на значительном удалении от них и имеют суммарную энергию $0{,}9 \cdot 10^{11}$ эв, близкую к энергии первых двух. Этот случай очень подходит для описанного механизма. Однако подобное простое истолкование других двух случаев вряд ли возможно. Так, случай [1] мог бы быть объяснен подобной схемой лишь если считать, что пара электронов, вошедших в эмульсию, уже приходит в сопровождении 5—6 сравнительно мягких фотонов ($\sim 10^8$—10^9 эв), излученных компонентами пары в воздухе или в установке.

Все сказанное приводит к выводу, что если и есть необходимость в привлечении какого-либо нового процесса, дающего добавочные фотоны сверх обычных тормозных, то этот процесс не должен быть особенно продуктивным. Неизбежна также значительная роль флуктуаций, которые благоприятствуют наблюдаемому явлению (естественно, что при наблюдении отбираются ливни, в которых флуктуации увеличивают число частиц).

Резюмируя, можно сказать, что:

1. Ливни [1,2] вызываются отнюдь не столь большим числом начальных фотонов, как полагали авторы [1]. Число фотонов нарастает по мере развития ливня, и первоначально их по крайней мере в несколько раз меньше, чем имеется пар.

2. Возможно, что ливни могут быть объяснены как результат обычной каскадной мультипликации в эмульсии (и в окружающем ее веществе) весьма малого числа начальных фотонов. Эта возможность связана с тем, что тормозное испускание требуемых фотонов осуществляется с вероятностью порядка 1 на отрезке, который в $\frac{4}{3} \ln \frac{E}{k_{\min}} \sim 10$ раз (для рассматриваемых случаев) меньше обычной лавинной единицы.

Отсутствие точной теории для малых толщин не позволяет сделать окончательный вывод.

Мы пользуемся случаем выразить благодарность М. И. Подгорецкому за ценное обсуждение вопроса.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР
Институт физики
Академии наук АрмССР

Поступило
6 IV 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] M. Schein, D. M. Haskin, R. G. Glasser, Phys. Rev., **95**, 855 (1954). [2] A. Debenedetti, C. N. Garelli, L. Talone, M. Vigone, G. Watagin, Nuovo Cim., **12**, No. 6, 954 (1954). [3] С. З. Беленький, Лавинные процессы в космических лучах, М., 1948. [4] В. Гайтлер, Квантовая теория излучения, М., 1948. [5] N. Arley, On the Theory of Stochastic Processes and their Application to the Theory of Cosmic Radiation, N. Y., 1948. [6] H. Y. Bhabha, S. K. Chakrabarty, Phys. Rev., **74**, 1352 (1948).

ПРИМЕЧАНИЕ ПРИ КОРРЕКТУРЕ

Авторы работы ([2]) в своем докладе на конференции в Пизе (июнь 1955 г.), как нам стало известно благодаря любезности С. Н. Вернова, также отмечают возможное влияние каскадных электромагнитных процессов. Однако они приходят к выводу, что каскадная теория не может объяснить явления.

Это расхождение в значительной мере, повидимому, обусловливается иным, чем у нас, выбором t-единицы, величины y, а также тем, что авторы ([2]) использовали раннюю работу Арли (N. Arley, Proc. Roy. Soc., **168**, 519 (1938)). Нам кажется поэтому, что категорическое утверждение авторов ([2]) о невозможности объяснения наблюденных ливней каскадными процессами является несколько преждевременным, пока не построена строгая каскадная теория для малых толщин фотоэмульсии. Аналогичное замечание следует сделать также и относительно количественной оценки числа каскадных пар, приведенной в докладе.