

Л. Х. ЭЙДУС, Н. М. БЛИНОВА, В. Г. ВИДЕНСКИЙ и Л. Д. СУВОРОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРИНЫ ЛИВНЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ НА УРОВНЕ МОРЯ

(Представлено академиком Д. В. Скобельцыным 17 VII 1950)

Результаты исследования ширины атмосферных ливней, предпринятого в 1938 г. Оже <sup>(1)</sup>, указывали на наличие расхождения экспериментальных данных с расчетами, выполненными на основе каскадной теории <sup>(2)</sup>. Зависимость числа совпадений разрядов в двух счетчиках от расстояния между ними, повидимому, удовлетворительно согласовалась с теорией для расстояний, меньших 100—150 м, в то время как на расстоянии 300 м число совпадений превышало ожидаемое значение. Однако недостаточная строгость расчетов для больших расстояний и ограниченность статистического материала не позволяли сделать заключение о существовании аномальной ширины ливней. Более того, расчеты, произведенные Мольером <sup>(3)</sup>, привели его к заключению о наличии удовлетворительного согласия опытных данных Оже с предсказаниями лавинной теории.

Метод, примененный Оже, не позволял достичь больших расстояний из-за значительного фона случайных совпадений.

В 1946 г. Г. Т. Зацепин и В. В. Миллер <sup>(4)</sup>, применив иной метод регистрации ливней, достигли расстояния в 980 м и обнаружили наличие резкого расхождения с предсказаниями теории. Как было показано в дальнейшем Д. В. Скобельцыным <sup>(5,6)</sup>, число совпадений на расстоянии в 1 км в десятки раз превосходит величину, полученную в результате последовательного применения лавинной теории.

В ряде работ <sup>(4,7,8)</sup> указывалось также на аномально широкое расхождение и электронов высокой энергии („ствола“ лавины). Предположение о существовании ядерно-каскадного процесса и его решающей роли в развитии широких ливней <sup>(9)</sup> качественно объясняет возможные источники расхождения лавинной теории с экспериментальными. Однако участие мало изученных ядерных процессов в образовании и прохождении через атмосферу широких ливней сильно запутывает картину ливня и подчас лишает возможности простой трактовки результатов опыта. В связи с этим изучение свойств широких ливней на малых высотах, близких к уровню моря, приобретает особый интерес. Преимущества исследования ливней на уровне моря заключаются в следующем.

1. Благодаря значительной фильтрации в атмосфере начальная средняя энергия регистрируемых ливней на уровне моря значительно больше, чем на высотах гор, и вклад проникающей компоненты в них, повидимому, больше.

2. Различный характер поглощения мягких и проникающих частиц (например,  $\mu$ -мезонов) может привести к возможности пространствен-

ного разделения различных компонент ливней (по высоте, а также на данной глубине в атмосфере). В этом случае анализ свойств электронно-фотонной части ливней позволит судить о достоверности данных каскадной теории, применяемой к объяснению воздушных ливней.

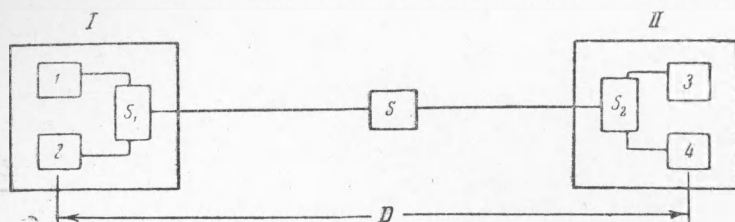


Рис. 1

Изучение же свойств проникающей компоненты может пролить свет на механизм ядерных процессов при сверхвысоких энергиях взаимодействия частиц.

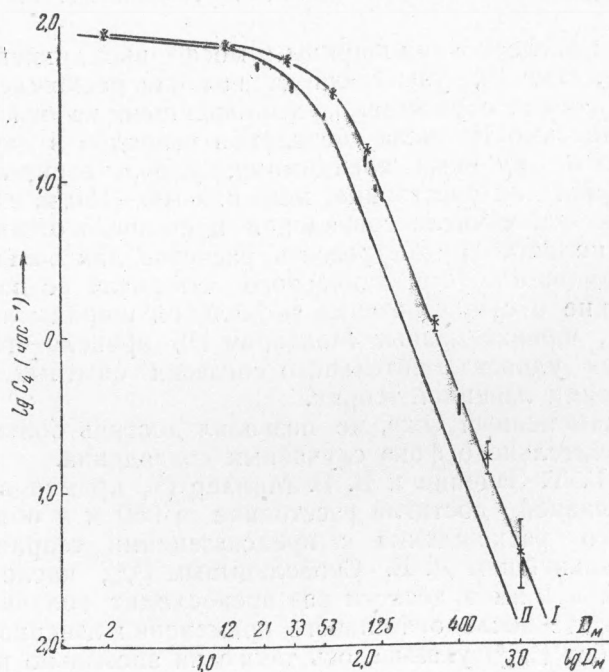


Рис. 2

Нами было предпринято исследование ширины атмосферных ливней на уровне моря методом многократных совпадений, предложенным Д. В. Скобелцыным и примененным ранее Г. Т. Зацепиным и В. В. Миллером для измерений на Памире ( $H = 3860$  м над уровнем моря). Схема установки приведена на рис. 1, где 1, 2, 3, 4 — группы счетчиков (каждая группа состояла из 12 быстродействующих счетчиков, включенных параллельно и расположенных вплотную друг к другу. Суммарная площадь счетчиков каждой группы равнялась  $3960 \text{ см}^2$ ). Усилители  $S_1$  и  $S_2$  отбирали двойные совпадения 1—2 и 3—4. Усилитель  $S$  регистрировал совпадения импульсов, приходящих от  $S_1$  и  $S_2$  по высокочастотному кабелю. Измерялось число четырехкратных совпадений ( $C_4$ ) в зависимости от расстояния  $D$  между установками I и II. Разрешающая способность усилителя соответствовала  $\tau = 4 \cdot 10^{-6}$  сек., что позволило пренебречь случайными совпадениями. Установки размещались в легких деревянных домиках.

Как известно из лавинной теории, ширина ливня определяется расхождением частиц малой энергии, рассеиваемых на достаточные углы. Благодаря этому „средний квадратичный радиус ливня“  $R$  практически не зависит от энергии первичных частиц, дающих начало лавине. Величина этого радиуса составляет на уровне моря  $\sim 70$  м<sup>(10)</sup> и должна увеличиваться с высотой в соответствии с изменением плотности воздуха и соответствующим изменением длины  $t$ -единицы. На высоте 3860 м  $R \cong 100$  м.

На больших расстояниях от оси ливня значительная доля электронов вызывается конверсией фотонов небольшой энергии, соответствующей области минимального коэффициента поглощения фотонов.

На рис. 2 приведена (в логарифмическом масштабе) зависимость  $C_4(D)$ , полученная Г. Т. Зацепиным и В. В. Миллером на Памире (кривая I). Если предположить, что в их работе основная часть совпадений вплоть до самых больших расстояний вызывалась лавинными электронами, то следует ожидать, что форма кривой  $C_4(D)$  для других высот может быть получена из приведенной зависимости путем изменения масштаба по оси абсцисс в соответствии с изменением величины  $t$ -единицы. Преобразованная таким образом кривая для уровня моря изображена на рис. 2, II. В табл. 1 приведены результаты измерений, произведенных нами на уровне моря в течение 1949—1950 гг. На рис. 2 соответствующие значения обозначены вертикальными черточками. Как видно из рисунка, на малых расстояниях ( $D < 50$  м) экспериментальные точки действительно ложатся на кривую II\*, подтверждая тем самым, что на этих расстояниях совпадения вызываются частицами электронно-фотонной лавины, обладающей резко очерченным „диаметром“ \*\*. Однако на больших расстояниях экспериментальные точки переходят с кривой II на недеформированную кривую I.

Таблица 1

| $D$ , м . . . . .              | 2              | 12           | 21           | 33             | 53             | 98             | 112            | 125            | 400             |
|--------------------------------|----------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Полное число совпад. $C_4$ . . | 758            | 393          | 315          | 535            | 337            | 154            | 317            | 186            | 39              |
| $C_4$ , совп/час . . .         | $92,5 \pm 3,3$ | $75 \pm 3,8$ | $53,5 \pm 3$ | $37,4 \pm 1,6$ | $24,6 \pm 1,4$ | $12,4 \pm 1,0$ | $8,65 \pm 0,5$ | $7,45 \pm 0,5$ | $0,34 \pm 0,06$ |

В пределах точности настоящих измерений форма „кривой раздвижения“ на больших расстояниях (до 400 м) не отличается от формы соответствующей кривой для высоты 3860 м, т. е. зависимость  $C_4(D)$  может быть выражена в виде  $C_4(D) \sim 1/D^k$ , где  $k = 2,6 \pm 0,15$ . Тем самым еще раз подтверждается, что атмосферные ливни обладают аномальной шириной.

\* Согласно лавинной теории, на расстояниях, малых по сравнению с радиусом ливня, закон пространственного расхождения частиц меняется с глубиной в атмосфере в соответствии с выражением  $\rho(r) \sim 1/r^{2-s}$ <sup>(14)</sup>. Это изменение должно сказаться и на форме „кривой раздвижения“ на малых расстояниях. Действительно, при  $D = 12$  м Крайбил<sup>(15)</sup> наблюдал различие в числе совпадений величиной около 5—10% при изменении высоты места наблюдения от 720 до 9200 м над уровнем моря. Естественно, что в нашем интервале высот это различие еще незначительнее. Кроме того, имеется известная неопределенность в значении  $C_4(D)$  при  $D = 1-2$  м (влияние узких ливней из крыши или воздуха). Чтобы обнаружить различие в форме „кривых раздвижения“ на малых расстояниях, требуется большая точность измерения. Совмещение „кривых раздвижения“ на уровне моря и на Памире производится для расстояний  $D = 5-10$  м. Исследование ширины ливней на уровне моря производится впервые, в связи с чем для сравнения с данными высотных измерений привлекаются лишь результаты самих авторов.

\*\* Вопрос о точном значении „диаметра“ ливней и согласии этого значения с предсказаниями каскадной теории в настоящей заметке не рассматривается.

Возможны различные объяснения аномальной ширины ливней. Наиболее естественными являются следующие предположения.

а) Лавинные частицы (электроны и фотоны) могут появиться в значительном количестве на гораздо больших расстояниях, чем это следует из современной каскадной теории, в силу несовершенства последней или благодаря наличию каких-либо неучтенных дополнительных механизмов рассеяния этих частиц.

б) Каскадная теория верна и правильно описывает поведение лавинных частиц. Тем не менее основную массу частиц на больших расстояниях от оси ливня составляют электроны, попавшие на периферию благодаря участию ядерных процессов в развитии широких ливней (например, электроны могут быть занесены тяжелыми ядерно-активными частицами (<sup>11</sup>), образовавшимися в результате ядерно-каскадного процесса (<sup>9</sup>). Не исключена и возможность существования нескольких стволов в ливнях (<sup>12,13</sup>)).

в) Расхождение лавинных частиц определяется каскадной теорией. Вне радиуса ливня, на больших расстояниях от его оси, основную массу составляют частицы иной природы и происхождения (например, мезоны и равновесные с ними электроны).

Описанные выше эксперименты свидетельствуют о том, что на больших расстояниях совпадения вызываются не короткопробежными частицами, выходящими из ствола электронно-фотонной лавины (п. а), а частицами, занесенными на периферию ливня иным механизмом. Можно предположить, что широкие ливни состоят из двух частей.

1) электронно-фотонной лавины, развивающейся по законам классической каскадной теории, и

2) обширной периферии, образованной частицами иного происхождения (пп. в или б).

Предположение а, повидимому, не соответствует действительности и экспериментальные „кривые раздвижения“ могут быть объяснены без допущения о неприменимости каскадной теории для объяснения электронно-фотонных лавин или наличия каких-либо отклонений в законах рассеяния мягких частиц \*. Для выяснения природы и происхождения частиц на периферии ливней требуются дальнейшие исследования. Наиболее естественно предположить, что на малых высотах периферия ливней составляет в значительной мере из  $\mu$ -мезонов и равновесных с ними частиц.

В заключение авторы выражают благодарность акад. Д. В. Скобельцыну, а также Н. А. Добротину и Г. Т. Зацепину за дискуссию результатов.

Поступило  
14 VII 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> P. R. Auger, Mazeet T. Grivet-Meyer, C. R., 206, 1721 (1938).  
<sup>2</sup> Д. В. Скобельцын, ДАН, 37, 16 (1942). <sup>3</sup> G. Moliere, Kosmische Strahlung, Berlin, 1943, S. 24. <sup>4</sup> Г. Т. Зацепин и В. В. Миллер, ЖЭТФ, 17, 939 (1947). <sup>5</sup> D. V. Skobel'tzyn, G. T. Zatsepin and V. V. Miller, Phys. Rev., 71, 315 (1947). <sup>6</sup> Д. В. Скобельцын, ДАН, 67, 45 (1949). <sup>7</sup> Д. М. Алексеев, Г. Т. Зацепин и И. Г. Морозов, ДАН, 63, 375 (1948). <sup>8</sup> Г. Т. Зацепин, С. А. Кучай и И. Л. Розенталь, ДАН, 61, 47 (1948). <sup>9</sup> Г. Т. Зацепин, ДАН, 67, 993 (1949). <sup>10</sup> С. З. Беленький, Лавинные процессы в космических лучах, 1948. <sup>11</sup> Г. Т. Зацепин и Л. И. Сарычева, ДАН, 69, 635 (1949). <sup>12</sup> Д. В. Скобельцын, ДАН, 67, 255 (1949). <sup>13</sup> Д. В. Скобельцын и Г. Т. Зацепин, ДАН, 73, № 6 (1950). <sup>14</sup> А. Мигдал, ЖЭТФ, 15, 313 (1945). <sup>15</sup> H. L. Krauybill, Phys. Rev., 76, 1092 (1949).

\* По мнению Г. Т. Зацепина, вывод об аномальной ширине „стволов“ ливней, базировавшийся на результатах работ (<sup>7,8</sup>), недостаточно обоснован, ибо авторами не учитывался ряд эффектов, в частности, флуктуации в прохождении лавины электронов через свинец, возможность попадания в один из экранированных счетчиков мезонов.