

С. Н. ВЕРНОВ и А. Н. ЧАРАХЧЬЯН

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЯДЕРНЫХ ЛИВНЕЙ И ПРОНИКАЮЩИХ ЧАСТИЦ В СТРАТОСФЕРЕ НА РАЗЛИЧНЫХ ШИРОТАХ

(Представлено академиком Д. В. Скобельцыным 26 V 1953)

Измерения интенсивности проникающей компоненты и числа электронно-ядерных ливней космических лучей в стратосфере были произведены на геомагнитных широтах 51° N, 31° N и 2° S. Полеты приборов производились на шарах-зондах. Приборы, с помощью которых выполнены измерения, были идентичными для всех трех широт.

Схема расположения счетчиков и поглотителя в приборе дана на рис. 1. Толщина двух блоков свинца между счетчиками I—III равна 10 см Pb. Способом, описанным в работе (1), по радио передавались данные о наличии разрядов во всех счетчиках в момент прохождения космической частицы через телескоп I—III. Разряды в любом из счетчиков 10—15, 1—9, а также в счетчике II отмечались с помощью годоскопической системы совпадений (при наличии совпадения разрядов в счетчиках I и III).

Из полученных данных измерений (после введения указанных ниже поправок) было определено на различных широтах число одиночных проникающих частиц (рис. 2) и число ливней (рис. 3). При прохождении одиночной частицы через телескоп I—III не может быть разряда в счетчиках 10—15 и может быть разряд только в одном из годоскопических счетчиков 1—9. Таким образом, число одиночных частиц определялось путем выделения из общего числа частиц, регистрируемых телескопом, таких случаев, когда, во-первых, не было разряда ни в одном из счетчиков 10—15 и, во-вторых, в счетчиках 1—9 либо не было разряда (случай прохождения частицы через щели между счетчиками 1—9), либо был разряд только в одном счетчике. Ливень отмечался, когда в счетчиках 1—9 срабатывало 2 или большее число счетчиков, либо был разряд в одном или большем числе счетчиков 10—15. В данные измерений были введены поправки на случайные совпадения и δ -ливни. Число случайных совпадений в стра-

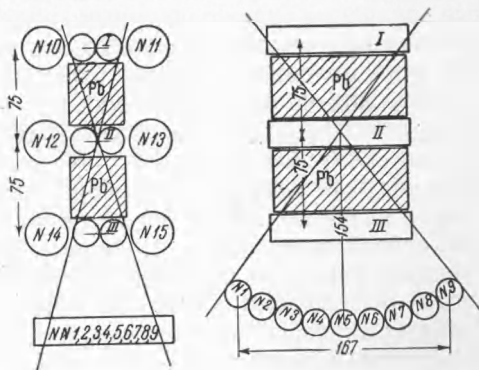


Рис. 1. Схема расположения счетчиков в приборе. Счетчики I и III включены в схему двойных совпадений, остальные счетчики — в схему совпадений годоскопа

тосфере составляло менее 2—3% от полного числа двойных совпадений I—III. Число δ -ливней было определено из измерений, выполненных на уровне моря перед полетом. Поэтому из числа зарегистрированных в стратосфере ливней надо было вычесть δ -ливни, составляющие 7% от числа одиночных частиц на соответствующей высоте, а число зарегистрированных одиночных частиц было по этой же причине увеличено на 7%. В представленных на рис. 2 и 3 результатах измерений введены поправки на δ -ливни и случайные совпадения.

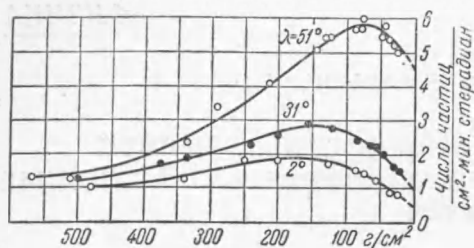


Рис. 2. Зависимость числа одиночных проникающих частиц от глубины наблюдения на широтах 51, 31 и 2° (статистическая точность для каждой точки порядка 3% для давлений меньше 150 г/м и 5% для больших давлений)

Для сопоставления абсолютной интенсивности проникающих частиц на различных широтах воспользуемся кривыми для одиночных проникающих частиц, изображенных на рис. 2. Экстраполяция этих кривых (пунктирная часть) до границы атмосферы для широты 51° дает 4,5 частиц \cdot см⁻² \cdot мин⁻¹ \cdot стерадиан⁻¹, для широты 31° 0,9 частиц \cdot см⁻² \cdot мин⁻¹ \cdot стерадиан⁻¹ и для широты 2° 0,45 частиц \cdot см⁻² \cdot мин⁻¹ \cdot стерадиан⁻¹. Будем основываться на предположении, что сечение для взаимодействия первичных космических

частиц с ядрами свинца равно геометрическому (это предположение было оправдано нашими опытами в стратосфере с различными толщинами свинца). Это дает, что вероятность ядерного взаимодействия в поглотителе 10 Рb равна 0,5. Поэтому полученные выше экстраполированные значения для одиночных проникающих частиц можно истолковать как значения половины потоков первичных космических частиц, падающих на границу атмосферы на широтах 15, 31 и 2°. При этом предполагается, что вероятность регистрации в приборе электронно-ядерного ливня, дающего двойные совпадения, близка к единице. Это предположение о большой эффективности регистрации числа электронно-ядерных ливней оправдывается тем, что 90% ливней отмечались путем срабатывания 3 или большего числа счетчиков (10—15 и 1—9).

Таким образом, получаем, что абсолютные интенсивности первичных космических частиц, падающих на границу атмосферы на широтах 51, 31 и 2°, соответственно, равны 9, 1,8 и 0,9 частиц \cdot см⁻² \cdot мин⁻¹ \cdot стерадиан⁻¹.

Рассмотрим высотные зависимости для одиночных проникающих частиц на широтах 31 и 2° (см. рис. 2) в области давлений 25—60 г/см². Рассматриваемый участок кривых простирается до глубины, соответствующей одному ядерному пробегу, для взаимодействия первичных космических частиц с ядрами азота. Поэтому в этом интервале давлений и обнаруживается интенсивное нарастание вторичных проникающих частиц от границы атмосферы. Из кривых видно, что характер возрастания вторичных проникающих частиц на широте 31° и характер возрастания на

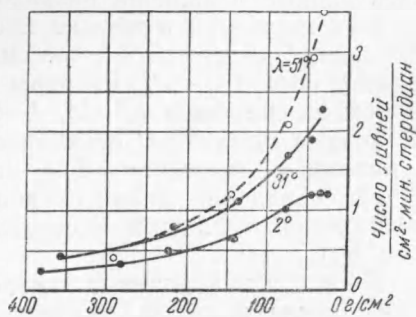


Рис. 3. Зависимость числа электронно-ядерных ливней от глубины места наблюдения в атмосфере на широтах 51, 31 и 2° (статистическая точность для каждой точки порядка 5% для давлений меньше 150 г/м и 10% для больших давлений)

широте 2° весьма близки друг к другу. Это следует из того, что отношение ординаты кривой для $\lambda = 31^\circ$ к ординате кривой для $\lambda = 2^\circ$ в пределах давлений 25—60 г/см² почти постоянно и равно 1,8—2. Эта цифра практически совпадает с полученным нами выше значением широтного эффекта (равного 2) для потока первичных частиц между широтами 31 и 2° . Таким образом, обнаруживается слабое увеличение числа вторичных проникающих частиц с увеличением энергии первичных ($E_{\text{кр}}^{31^\circ} = 7$ Мэв, $E_{\text{кр}}^0 = 15$ Мэв).

Из изложенных экспериментальных данных становится правдоподобным, что слабая зависимость коэффициента множественности для образования вторичных частиц, генерируемых в электронно-ядерных ливнях, имеет место не только для сверхвысоких энергий первичных частиц, но и при умеренных энергиях, к которым относятся данные наших измерений.

Рассмотрим высотные зависимости числа электронно-ядерных ливней на широтах 51, 31 и 2° . Из рис. 3 видно, что широтный эффект числа измеренных ливней между широтами 51 и 31° при давлениях больше 150—200 г/см² ничтожно мал. Лишь на самых больших высотах (25 г/см²) широтный эффект для числа ливней достигает 1,4. В то же время широтный эффект для числа первичных частиц между этими широтами равен 5. С другой стороны, широтный эффект для числа ливней между широтами 31 и 2° заметен и на больших глубинах атмосферы, а на предельно большой высоте отношение числа измеренных ливней на широте 31° к числу ливней на широте 2° равно 2. Это совпадает с широтным эффектом для первичных частиц между этими широтами. Следовательно, малый широтный эффект для числа ливней между широтами 51 и 31° по сравнению с широтным эффектом для первичных частиц указывает, что первичные частицы малых энергий ($E_{\text{кр}}^{51^\circ} = 1,5$ Мэв) при взаимодействии с ядрами атомов свинца генерируют, повидимому, ядерные расщепления, а не электронно-ядерные ливни, как это имеет место для больших энергий.

Вычитание из кривой ливней на широте 51° кривой ливней на широте 31° дает высотную зависимость числа электронно-ядерных ливней, генерируемых первичными частицами с энергией меньше 7 Мэв. Получающаяся таким образом кривая для ливней аппроксимируется в пределах давлений 30—150 г/см² экспоненциальной функцией e^{-x/β_0} , где x — давление от границы атмосферы в г/см², а $\beta_0 = 60$ г/см². Таким образом получается, что эффективный пробег для поглощения первичных частиц с энергиями меньше 7 Мэв соответствует пробегу для поглощения с сечением, равным геометрическому сечению для ядер азота.

Заметим, что на широте 51° значение потока первичных частиц с энергиями меньше 7 Мэв равно 7,2 частицам \cdot см⁻² \cdot мин⁻¹ \cdot стерадиан⁻¹. Согласно только что выясненному закону поглощения их в стратосфере, поток первичных частиц на глубине, соответствующей давлению 30 г/см, должен равняться 4,2 частицам \cdot см⁻² \cdot мин⁻¹ \cdot стерадиан⁻¹. Вероятность генерации этими частицами электронно-ядерных ливней в поглотителе (10 см Pb) равна 0,5. Следовательно, ожидаемое число электронно-ядерных ливней, регистрируемых на глубине 30 г/см² стратосферы, будет 2,1 ливня \cdot см⁻² \cdot мин⁻¹ \cdot стерадиан⁻¹. Однако, как видно из рис. 3, реальное число измеренных ливней, которое соответствует разности ординат кривых ливней на широтах 51 и 31° , на глубине 30 г/см² равно 1,2 ливня \cdot см⁻² \cdot мин⁻¹ \cdot стерадиан⁻¹. Из приведенного расхождения между измеренным числом ливней на глубине 30 г/см² и ожидаемым естественно сделать вывод, что примерно половина первичных частиц за счет малой их энергии не генерирует электронно-ядерных ливней в свинце, а дает ядерные расщепления, которые ввиду большой толщины поглотителя не смогут быть обнаружены нашими измерениями. Пользуясь степенным видом энергетического спектра первичных частиц с показателем (для дифференциального спектра), равным 2 (что является в настоящее время

мя хорошим приближением), мы можем в нашем случае оценить, с какой энергии начинается генерация электронно-ядерных ливней. Эта энергия получается около 3 Мэв.

Разность ординат кривых для широт 31 и 2° (рис. 3) дает высотную зависимость числа электронно-ядерных ливней, генерируемых первичными частицами с энергией от 7 до 15 Мэв. Получающуюся таким образом кривую также можно в довольно широком интервале давлений аппроксимировать экспоненциальной функцией $e^{-x/\beta}$, где $\beta = 120$ г/см², т. е. в 2 раза больше, чем $\beta_0 = 60$ г/см. Получается, что эффективный пробег для поглощения первичных частиц с энергией от 7 до 15 Мэв в 2 раза больше пробега для одноактного поглощения, имеющего место для первичных частиц с энергиями меньше 7 Мэв. Столь резкое изменение эффективного пробега для поглощенных первичных космических частиц в зависимости от их энергии лучше всего объяснить, исходя из представления об ядерно-каскадном процессе, открытом при исследовании широких атмосферных ливней советскими физиками на Памире (2). Из выполненных нами измерений следует, что этот процесс, повидимому, начинает проявляться, когда энергия частицы, генерирующей электронно-ядерные ливни, становится больше 7 Мэв.

Воспользуемся приближенным соотношением, связывающим эффективный пробег для поглощения первичных частиц, генерирующих электронно-ядерные ливни, с числом вторичных заряженных ядерно-активных частиц (пераспадающихся) (3).

$$\beta = \frac{\beta_0}{1-k},$$

где β — пробег для поглощения первичных частиц; k — число вторичных ядерно-активных частиц (заряженных), отнесенное к одной первичной частице; β_0 — пробег для взаимодействия.

Указанное соотношение имеет место при предположении, что сечение для ядерного взаимодействия вторичных и первичных частиц одинаково и пройденный путь первичных частиц в веществе мал по сравнению с ядерным пробегом для взаимодействия. Для первичных частиц с энергией ниже 7 Мэв величина β_0 в приведенном выше соотношении равна 60 г/см, поэтому $k = 0$. Для другого интервала энергии (от 7 до 15 Мэв) $\beta = 2\beta_0$, поэтому $k = 0,5$, а для области энергии > 15 Мэв (на широте 2°), где кривая ливней на больших высотах не имеет заметного наклона, величина k получается порядка единицы. Таким образом, мы приходим к выводу, что для энергии первичных космических частиц более 7 Мэв генерация ядерно-активных протонов в электронно-ядерных ливнях резко возрастает с энергией и, повидимому, значительно резче, чем генерация ядерно-неактивных проникающих частиц (μ -мезонов, возникающих от распада π -мезонов в стратосфере).

Поступило
23 IV 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ С. Н. Вернов, А. Н. Чарахчьян, ДАН, 62, 319 (1948). ² Г. Т. Зацепин, ДАН, 67, 993 (1949). ³ Г. Т. Зацепин, ЖЭТФ, 19, 1104 (1949).