

Д. В. СКОБЕЛЬЦЫН, член-корреспондент Академии Наук СССР, и С. Н. ВЕРНОВ

О МЯГКОЙ КОМПОНЕНТЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СВЯЗИ С ВОПРОСОМ О РАСПАДЕ МЕЗОТРОНОВ

Принятая в настоящее время схема двух компонент дает вполне отчетливую картину явлений космического излучения в тех областях, где одна из компонент преобладает, т. е. в верхних слоях атмосферы, с одной стороны, и ниже уровня моря, — с другой. При рассмотрении же кривой поглощения в промежуточной области — в нижних слоях атмосферы — возникают существенные трудности.

В переходном слое у верхней границы атмосферы налицо лавина электронов (и фотонов), вызванная первичными электронами космического происхождения. Ход нарастания этой лавины и ее поглощения в точности описывается каскадной теорией. Однако по данным той же каскадной теории мягкая компонента, состоящая из каскадных электронов, доминирующая в стратосфере, практически полностью поглощается в верхних слоях атмосферы и не проникает дальше уровня, соответствующего высоте 4—4,5 км над поверхностью земли. Происхождение преобладающей части мягкой компоненты, наблюдаемой ниже этого уровня, должно быть иное. Наиболее естественно предположить, что мягкая компонента, наблюдаемая в нижних слоях атмосферы, создается проникающей частью излучения и является продуктом тех или иных процессов, вызываемых проникающими частицами. Непосредственное указание в пользу такого предположения дают наблюдения Юнга и Стрита⁽¹⁾, согласно которым геомагнитный эффект обеих компонент, наблюдаемый на различных высотах и возрастающий с высотой, оказывается вплоть до высоты 4 300 м одинаковым.

Исключительные трудности для толкования представляет, однако, тот факт, что ход интенсивности обеих компонент с высотой совершенно различен. Подъем кривой, представляющей рост мягкой компоненты, оказывается несравненно более крутым, чем подъем кривой поглощения жесткой компоненты. Поэтому, если мягкая компонента возбуждается жесткой и сопровождает эту последнюю, то о равновесии в обычном смысле между ними не может быть речи: число электронов на один мезотрон весьма быстро растет с высотой.

Согласно Гейзенбергу и Эйлеру⁽²⁾ механизм, ответственным за образование электронной компоненты, наблюдаемой в нижних слоях атмосферы, является спонтанный распад мезотронов. Мы покажем, что такое предположение неприемлемо, так как оно не может привести к объяснению наблюдаемого расхождения между кривыми, определяющими рост двух компонент с высотой.

Число электронов распада, сопровождающих один мезотрон, может быть определено путем весьма простого расчета, исходя из следующего очевидного положения: в случае равновесия энергия, затрачиваемая на еди-

ницу длины первичным излучением и передаваемая вторичным электронам, должна равняться энергии, затрачиваемой на ионизацию (на единице длины) всеми электронами, сопутствующими первичной частице и образовавшимися в результате каких угодно процессов, вызванных этими вторичными электронами. Т. е., иначе говоря, если вероятность образования мезотроном электрона с энергией E на единицу длины пути есть P и число электронов-спутников в равновесии на одну частицу— n , то

$$PE = n\beta, \quad (1)$$

где β —средняя удельная потеря энергии электронов-спутников.

В применении к распаду мезотрона мы имеем $P = \frac{1}{\tau c}$ см⁻¹; поскольку, однако, $\tau = \frac{\tau_0 E'}{\mu c^2}$ (где E' —полная энергия мезотрона и μ —его масса покоя, а τ_0 —время распада) и $E' = 2\bar{E}$, т. е. энергия электрона распада в среднем равна половине энергии мезотрона, если мезотрон распадается на электрон и нейтрино, то энергия мезотрона исключается из уравнения (1), и число сопровождающих электронов на один мезотрон оказывается не зависящим от энергии первичной частицы, а следовательно, и от вида спектра проникающей компоненты:

$$n = \frac{PE}{\beta} = \frac{\mu c}{2\tau_0 \beta_0 \delta}, \quad *$$

где δ —плотность среды.

Мы принимаем $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ сек., $\mu = 170$ м, $\beta_0 = 2.2 \frac{\text{MeV}}{g} \text{ см}^2$.

Эта формула отличается от той, которую дают Гейзенберг и Эйлер. Численные результаты этих авторов и наши расходятся, однако, не очень значительно. Поскольку величина n может быть связана с константой τ_0 путем приведенных простых соображений независимо от каких-либо произвольных допущений и приближений и независимо от спектра мезотронов, измерение величины n в принципе может служить одним из наиболее непосредственных способов определения константы распада**.

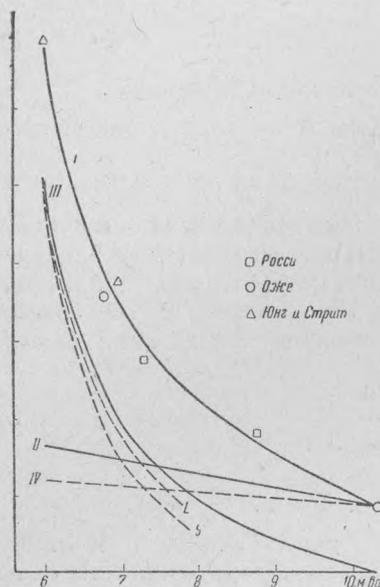
В связи с затронутым нами вопросом существенно то, что, поскольку возможное изменение с высотой кривой спектрального распределения первичных (проникающих) частиц не может оказать влияния на величину n , относительная интенсивность мягкой компоненты, связанной с электронами распада, растет не быстрее, чем обратно пропорционально плотности. (Так как число медленных мезотронов в процентном отношении может лишь возрастать с высотой, влияние фактора, отмеченного в примечании, может приводить лишь к замедлению роста величины n с высотой.)

* Необходимое условие применимости этой формулы представляет требование, чтобы интенсивность первичного излучения можно было считать приблизительно постоянной на длине пробега электрона распада—условие, которое в действительности выполняется.

** В применении к экспериментам типа описанных в заметке К. И. Алексеевой⁽¹⁰⁾ (см. выше) существенным условием является малая расхожимость между направлениями мезотрона и вторичного электрона. Легко убедиться, что это условие выполняется вплоть до довольно малых скоростей мезотрона. Так, например при $pc = 3 \cdot 10^8$ eV половина энергии электронов распада сконцентрирована в конусе с углом 14° около направления первичного мезотрона. Легко показать, что поправка, которую можно было бы ввести, если учесть наличие более медленных мезотронов, незначительна.

Распад медленных мезотронов, потерявших большую часть своей скорости, не учитывается формулой (2). Основываясь на кривой поглощения проникающей компоненты, можно, однако, показать, что распадом таких мезотронов можно пренебречь.

Поскольку ход с высотой величины относительной интенсивности n известен, можно, основываясь на имеющихся данных о росте жесткой компоненты (кривая IV фигуры), получить кривую возрастания с высотой числа вторичных электронов, вызванных распадом мезотронов. На фигуре показана как эта кривая II (проведенная в предположении, что половина интенсивности всей мягкой группы на уровне моря происходит от электронов распада*, так и экспериментальная кривая I, построенная по данным ряда наблюдателей.



Приведенные кривые ясно показывают, что уже на высоте 3500 м (6.8 м воды ниже границы атмосферы) электроны распада могут составлять лишь малую часть всей наблюдаемой на этой высоте мягкой компоненты**. Предположение о том, что остальная—большая—часть (кривая III) должна быть приписана каскадным электронам, проникающим из верхних слоев атмосферы, не может быть приведено в согласие с данными лавинной теории. В случае наличия лавины, проникающей из стратосферы, коэффициент поглощения определяет по порядку величины энергию той части первичных (космических) электронов, которые ответственны за ход кривой поглощения на данной глубине. Наклону кривой III соответствует энергия первичных электронов порядка 10^{11} eV

[пунктирные кривые L и S вычислены по данным теорий Ландау (4) и Сербера (5) соответственно]***. Этой энергии отвечает, однако, также и вполне определенное соотношение между интенсивностью в максимуме лавины и на данной глубине (6.5 м воды). Это отношение согласно данным теории Сербера равно $\frac{J_{\max}}{J_{6.5(\text{мягк})}} = 16$.

Учитывая величину $J_{6.5(\text{мягк})}$, можно показать, что максимум каскадной кривой рассматриваемых электронов с энергией $>10^{11}$ eV существенно превысил бы максимум, в действительности наблюдаемый на экваторе****. Первичным электронам в области скоростей выше 10^{11} eV пришлось бы в этом случае приписать полную энергию, во много раз большую той, которая им приписывается согласно данным о первичном спектре Милликена (7) и Вернова (8).

Независимо от малой приемлемости такого допущения предположение о том, что мягкая компонента, наблюдаемая на рассматриваемых глуби-

* Согласно наблюдениям Алексеевой (см. выше) возможность того, что число электронов распада, сопровождающих проникающие частицы на уровне моря, превышает указанную величину, можно считать исключенной. Однако даже если мягкую компоненту приписать целиком электронам распада, наклон кривой изменится несущественно.

** То же самое непосредственно следует, повидимому, и из давнишних данных Милликена (3) с сотрудниками относительно поглощения космической радиации в горных озерах. В этом случае электроны распада исключены, однако ход кривой поглощения не отличается существенно от того, который имеет место в атмосфере.

*** На глубине 6.5 м ($t=17$), $\mu=0.99 \text{ м}^{-1}$ воды, согласно кривой II, $\lambda(s)=0.38 \text{ см}$.(4)

**** По данным Пфотцера (6) интенсивность в максимуме в средних широтах в 40—45 раз больше интенсивности на уровне моря. На экваторе же высота максимума в 4 раза меньше, чем в средних широтах.

нах, генетически связана с первичными внеземными электронами в указанной области энергии (порядка 10^{11} eV или выше), отпадает еще и потому, что, как установлено Юнгом и Стритом, эта компонента подвержена влиянию магнитного поля земли. Электроны же меньших скоростей исключаются из рассмотрения в силу того, что отмеченные выше расхождения сказываются в отношении меньших энергий в гораздо более резкой степени*.

Таким образом мы приходим к заключению, что гипотеза о распаде мезотронов не дает возможности для объяснения хода мягкой компоненты в нижних слоях атмосферы в рамках лавинной теории.

Для объяснения наблюдаемой кривой естественно было бы предположить, что или: 1) проникающая способность лавин значительно больше той, которая им приписывается каскадной теорией (такое положение вещей могло бы иметь место в том случае, если бы кроме электронов и фотонов какое-то участие в каскадных процессах принимали также и другие, более проникающие частицы), или 2) что налицо какая-то третья компонента, характеризующаяся значительной поглощаемостью в равновесии с большим количеством сопровождающих ее электронов.

Оба эти предположения, однако, несовместимы с упомянутой выше особенностью, установленной наблюдениями Юнга и Стрита: величины геомагнитного эффекта мягкой и жесткой группы равны и возрастают с высотой пропорционально. Этот факт говорит довольно однозначно за то, что обе компоненты неразрывно связаны (интенсивности их, наблюдаемые на данной глубине в различных широтах, пропорциональны). Объяснение наблюдаемого хода кривых поглощения — наличия резкой расходимости кривых (*I* и *IV*) двух компонент — представляет, однако, в этом случае исключительные трудности. Какие-то существенно новые фундаментальные предположения о механизме поглощения потребуются для того, чтобы привести в согласие указанные выше факты, если полученный Юнгом и Стритом результат отвечает действительности.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академия Наук СССР
Москва

Поступило
21 XI 1939

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ R. Joung a. J. Street, Phys. Rev., 52, 552 (1937). ² H. Euler u. W. Heisenberg, Erg. d. exact. Naturw., 7 (1938). ³ R. A. Millikan a. G. H. Cameron, Phys. Rev., 28, № 5 (1926); 31, № 2 (1928); 31, № 6 (1928). ⁴ L. Landau a. G. Rumer, Proc. Roy. Soc., 166, № 925 (1938). ⁵ Serber, Phys. Rev., 54, 317 (1938). ⁶ G. Pfozzer, ZS. d. Physik, 102, 23 (1936). ⁷ Bowen, Millikan, Neher, Phys. Rev., 53, 217, 855 (1938); 52, 80 (1937). ⁸ С. Н. Вернов и А. В. Миронов, ДАН, XXIII, № 2 (1939); С. Н. Вернов, ДАН, XXIII, № 2 (1939). ⁹ P. Auger, R. Maze, P. Ehrenfest et A. Fréon, Journ. de Physique et le Rad., sér. VII, T. X, № 4 (1939). ¹⁰ К. И. Алексеева, ДАН, XXVI, № 1 (1940).

* Интенсивность потока каскадных электронов, связанных с большими энергиями— 10^{12} — 10^{13} eV.—известна по данным Оже (⁹) и сотрудников о числе больших ливней, наблюдаемых в атмосфере. Эта интенсивность ничтожна.