

К. И. АЛЕКСЕЕВА

О ЧИСЛЕ «ЭЛЕКТРОНОВ РАСПАДА», СОПРОВОЖДАЮЩИХ ПРОНИКАЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 17 XI 1939)

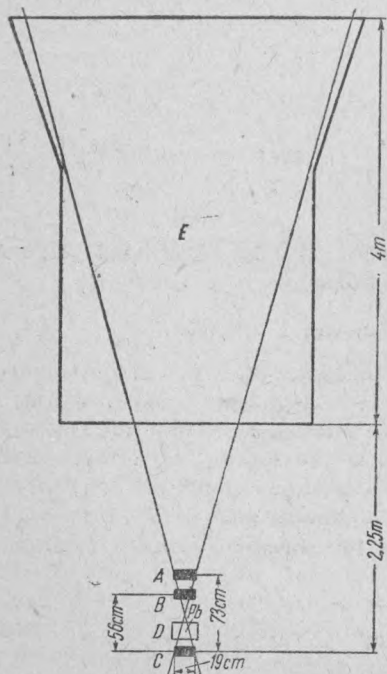
Согласно современным представлениям тяжелые электроны, образующие проникающую компоненту космического излучения, неустойчивы. В пользу этого говорит, например, аномально большое ослабление проникающей компоненты, измеряемой под углом к вертикали, по сравнению с поглощением такой же массой воздуха при распространении по вертикали. При этом по теории Юкавы тяжелые электроны распадаются на электроны и нейтрино. До сих пор не имеется экспериментальных данных относительно этих электронов распада.

Последние экспериментальные данные указывают на то, что мягкая компонента, наблюдаемая на уровне моря, имеет вторичное происхождение и связана с проникающей компонентой космического излучения. Предполагается, что в основном она создается δ -электронами, образующимися при взаимодействии проникающих частиц с поглощающей средой и электронами распада, образовавшимися в различных слоях атмосферы. Д. В. Скобельцыным был предложен опыт для непосредственного определения на уровне моря количества мягкой компоненты, создаваемой электронами распада, образовавшимися в атмосфере. Этот опыт заключался в следующем.

Возникающие в верхних слоях атмосферы мезотроны проходят значительный путь прежде, чем достигнуть уровня моря. При этом они частично успевают распасться. Если на пути космических лучей поставить плотный фильтр достаточной толщины с атомным номером, близким к атомному номеру воздуха, то вся мягкая компонента от электронов распада, образовавшихся в атмосфере, будет им поглощена. Так как время прохождения мезотронов через фильтр очень мало, то практически распад мезотронов при прохождении их через фильтр происходить не будет. Что касается электронов, получающихся от распада поглощенных фильтром мезотронов, то из них будут зарегистрированы установкой только те, которые образовались в нижнем слое фильтра. Однако число этих электронов незначительно. Оно не должно превышать 2% от проникающей компоненты. Поэтому, если измерить интенсивность мягкой компоненты в воздухе в процентах от интенсивности проникающей, а затем под фильтром из вещества с атомным номером, близким к атомному номеру воздуха (дерево, уголь, вода), то разность этих величин должна дать интенсивность излучения, соответствующего электронам распада, поскольку равновесные интенсивности (δ -излучение) в воздухе и в данном

легком материале можно считать одинаковыми. При этом толщина фильтра должна быть достаточной для поглощения всей мягкой компоненты от электронов распада, образовавшихся в атмосфере.

Измерения были выполнены в специальном помещении, в котором крышей служило листовое железо 0.3 мм толщины, при-отсутствии каких-либо других перекрытий. Для работы была использована схема тройных совпадений в счетчиках Гейгер-Мюллера, расположенных по вертикали.



Тройные совпадения отбирались с помощью усилителя Джонсона. Расположение счетчиков и фильтра схематически изображено на фигуре. *A*, *B* и *C*—коробки, содержащие каждая по 5 латунных счетчиков, включенных между собой параллельно*. *D*—слой свинца толщиной 15 см, вдвигавшийся между *B* и *C* для выделения проникающей компоненты. *E*—фильтр из дерева, расположенный над счетчиками. Толщина фильтра была эквивалентна 1.6 м воды. Это соответствовало ионизационному пробегу электронов с энергией $4.5 \cdot 10^8$ eV. Телесный угол, захватываемый счетчиками, был целиком закрыт фильтром. Для уменьшения ошибки вследствие малой расходимости частиц в ливнях, образовавшихся в дереве, установка была расположена на полу помещения. Расстояние от нижней коробки до центра фильтра было равно 4.25 м. Таким образом в среднем только те ливневые частицы регистрировались установкой как одна, угол между которыми был меньше $2^\circ 30'$. Проверка влияния расходимости на результат не была выполнена вследствие

больших размеров фильтра по сравнению с тем расстоянием, на которое счетчики могли быть придвинуты к фильтру.

Результаты измерений приведены в таблице (см. стр. 29).

Приведенная таблица показывает, что искомый эффект (в процентах к проникающему излучению) оказался равным $8 \pm 2\%$.

Найденное значение может быть несколько преувеличенным за счет возможного влияния недостаточной расходимости ливней из дерева.

Д. В. Скобельцын и С. Н. Вернов⁽¹⁾ с помощью элементарных соображений показали, что процент мягкой компоненты, создаваемой электронами распада, по отношению к проникающей компоненте в атмосфере не зависит от вида спектра проникающих частиц и выражается простой формулой:

$$x = \frac{\mu c^2}{2 \cdot \tau_0 \cdot c \cdot a}, \quad (1)$$

где μ —масса тяжелого электрона, c —скорость света, τ_0 —средняя продолжительность жизни покоящегося тяжелого электрона, a —среднее значение ионизационных потерь электрона на 1 см пути в области энергий,

* Каждый из счетчиков имел длину 190 мм, внутренний диаметр 28 мм, толщину стенок 0.3 мм латуни. Полная толщина вещества стенок счетчиков, проходимая космическими лучами, вызывающими совпадения, была равна $0.03 \times 5 \times 8.4 = 1.3$ г см². Счетчики не были заключены в сплошные стеклянные чехлы. Для увеличения эффективности счетчиков, работающих параллельно, каждый из них был приключен к усилителю Джонсона через отдельную емкость и сопротивление.

Без Рb				15 см Рb между счетчиками				
Продолжительность измерений	Полное число тройных совпадений	Число тройных совпадений в 1 час	Среднее значение атмосфер. давл.	Продолжительность измерений	Полное число тройных совпадений	Число тройных совпадений в 1 час	Число совпадений в 1 час с учетом поглощения в 15 см Рb $\mu=4.5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ Рb	Среднее значение атмосфер. давл.

В о з д у х

153 ч. 10 м.	36 249	236.7	753.2	154 ч.	26 609	172.8	484.9	753.1
-----------------	--------	-------	-------	--------	--------	-------	-------	-------

Интенсивность мягкой компоненты в процентах от интенсивности проникающей в воздухе $28 \pm 0.9\%$.

Фильтр из дерева (вод. экв.—20 см)*

20 ч. 08 м.	4 621	229.5	757.0	24 ч. 38 м.	4 283	173.9	486.0	755.5
-------------	-------	-------	-------	-------------	-------	-------	-------	-------

Интенсивность мягкой компоненты в процентах от интенсивности проникающей под фильтром из дерева (водяной эквивалент—20 см) $23.4 \pm 2.3\%$.

Фильтр из дерева (вод. экв.—160 см)**

114 ч. 45 м.	23 811	207.5	752.5	110 ч. 15 м.	17 815	161.6	472.9	752.2
-----------------	--------	-------	-------	-----------------	--------	-------	-------	-------

Интенсивность мягкой компоненты в процентах от интенсивности проникающей под фильтром из дерева (вод. экв.—160 см) $20.0 \pm 1.2\%$.

соответствующей спектру мягкой компоненты, образовавшейся от электронов распада.

Если принять $\mu = 170 \text{ м}$, $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$, $a = 2.84 \cdot 10^3 \text{ eV/см}$ на уровне моря***, то из этой формулы для количества x электронов распада на уровне моря получается значение 25% . Это значение в 3 раза превосходит то, которое получено в данной работе экспериментальным путем.

Померанц и Джонсон (2) недавно опубликовали предварительное сообщение о результатах своей работы по определению на уровне моря интенсивности мягкой компоненты, создаваемой электронами распада. Они определяли интенсивность мягкой компоненты в вертикальном направлении при наличии дополнительного свинцового поглотителя над установкой и под некоторым углом к вертикали без свинцового поглотителя. В обоих случаях масса вещества, проходимая космическими лучами, была одинакова. Однако опыт был поставлен авторами принципиально неправильно,

* Следует также отметить, что предварительные измерения, выполненные на двойных совпадениях (расстояние между коробками равно 30 см) с толщиной дерева, эквивалентной 50 см воды, дали разность процентов в воздухе и дереве $5.4 \pm 4.5\%$, согласующуюся с данными, полученными на тройных совпадениях.

** Повидимому, следует считать, что толщина дерева, эквивалентная 160 см воды, была практически достаточна для поглощения мягкой компоненты от электронов распада. Наши опыты показали, что уже небольшой слой дерева (20 см вод. экв.) давал больше половины всего наблюдаемого эффекта.

*** Среднее значение ионизационных потерь взято из работы Д. В. Скобелына и С. Н. Вернова (1). Значение получено на основании предположения, что спектр электронов, созданных электронами распада при каскадных процессах, имеет вид, полученный И. Е. Таммом и С. З. Бельским в их работе: «On the soft component of cosmic rays at sea level», печатающейся в журнале: Journal of Physics Academy of Sciences of the USSR, vol. I, № 3 (1939).

так как при работе с мягкой компонентой нельзя было брать в качестве дополнительного поглотителя над счетчиками свинец—вещество с атомным номером, очень сильно отличающимся от атомного номера воздуха.

По измерениям Франк-Каменецкого⁽³⁾ регистрируемое счетчиками равновесное δ -излучение, сопровождающее проникающую компоненту, значительно больше в веществах с малым Z , чем в веществах с большим Z . Так, в алюминии равновесная интенсивность составляет 11%, в свинце—4.5% по отношению к проникающему излучению. Между тем Померанц и Джонсон совершенно ошибочно принимают равновесные интенсивности в воздухе и свинце одинаковыми. В связи с этим полученное ими для x значение 22% является неверным.

Формула (1) показывает, что рост x с высотой обратно пропорционален a , а следовательно, обратно пропорционален плотности воздуха. Равновесная же интенсивность (δ -электроны) проникающей компоненты с высотой не должна возрастать. В то же время измерения Оже⁽⁴⁾, Росси⁽⁵⁾, Юнга и Стрита⁽⁶⁾ дают значительное возрастание мягкой компоненты с высотой даже на малых высотах. Отсюда следует, что некоторая часть мягкой компоненты на уровне моря и на небольших высотах не находится в равновесии с проникающей компонентой и не связана ни с электронами распада, ни с δ -излучением. Очевидно, и ниже уровня моря часть мягкой компоненты не находится в равновесии с проникающей компонентой космического излучения.

Как было указано раньше, при постановке темы предполагалось, что вся мягкая компонента на уровне моря находится в равновесии с проникающей компонентой. Наличие же неравновесной интенсивности в условиях нашего эксперимента должно было увеличить измеряемый нами эффект вследствие поглощения ее в фильтре из дерева. Поэтому весьма желательно было бы ввести соответствующую поправку в наши измерения. Данные Милликэна и Кэмерона⁽⁷⁾ по определению интенсивности космического излучения в горных озерах при помощи ионизационной камеры дают ход полной интенсивности космического излучения. Электроны распада здесь полностью исключены. Весьма желательно было бы сравнить наши данные с данными этих опытов на соответствующих глубинах. К сожалению, в связи с тем, что в опытах Милликэна и Кэмерона измерялась космическая радиация, достигающая прибора по всем направлениям, а в наших опытах измерялась интенсивность вертикального пучка, не представляется возможным провести точное сравнение, так как пересчет по формуле Гросса вносит значительные ошибки. Однако приближенная оценка показывает, что значительная доля измеренного нами эффекта вызвана поглощением этой неравновесной интенсивности в фильтре из дерева. Эта поправка может быть введена также по данным опытов Барноти и Форро.

Барноти и Форро⁽⁸⁾ с помощью двойных совпадений измерили угловое распределение интенсивности мягкой и проникающей компоненты на уровне моря. Так как по формуле (1) интенсивность мягкой компоненты от электронов распада (в процентах к проникающей компоненте) зависит лишь от плотности воздуха, то указанный процент должен быть постоянным для любых направлений. Равновесное δ -излучение (в процентах к проникающему излучению) также должно оставаться постоянным при изменении угла. Поэтому изменение процента мягкой компоненты при изменении угла могло быть обусловлено только наличием на уровне моря неравновесной мягкой компоненты, испытывающей поглощение за счет увеличения массы вещества над счетчиками при наклоне.

Наши опыты были произведены при полной толщине поглощающего слоя вещества над счетчиками, эквивалентной 10 м и 11.6 м воды. По массе

это соответствует массе воздуха, проходимой космическими лучами под зенитными углами 0° и $30^\circ 30'$ на уровне моря. Пользуясь эмпирическими формулами для интенсивности мягкой и проникающей компоненты в зависимости от зенитного угла, данными Барноти и Форро, мы получаем для интенсивности мягкой компоненты (в процентах к проникающей компоненте): при 0° 26.5%, при $30^\circ 30'$ 20.4%. Таким образом при наших измерениях введение слоя дерева, эквивалентного 1.6 м воды, должно было вызвать уменьшение полного количества мягкой компоненты на 6% (в процентах к проникающему излучению) за счет поглощения неравновесного мягкого излучения. Это означает, что, повидимому, только небольшая доля обнаруженного нами эффекта должна быть отнесена за счет электронов распада.

Если принять, что указанная выше поправка на поглощение неравновесной интенсивности в дереве реальна, то из формулы (1) для средней продолжительности жизни покоящегося мезотрона получается значение $\tau_0 \geq 25 \cdot 10^{-6}$ сек. Однако большинство имеющихся в настоящее время экспериментальных данных по распаду мезотронов дает для τ_0 значение $2 - 4 \cdot 10^{-6}$ сек. Чем же можно объяснить это расхождение в значениях τ_0 ? Так как в настоящее время имеется уже большой экспериментальный материал по распаду мезотронов, то нет оснований сомневаться в правильности значения $\tau_0 = 2 - 4 \cdot 10^{-6}$ сек. Однако при выводе формулы (1) было сделано предположение, что мезотрон распадается на электрон и нейтрино, вследствие чего электрон распада в среднем получает половину энергии мезотрона. Если же предположить, что при распаде мезотрона кроме электрона образуется не одно, а несколько нейтрино или одна нейтральная частица большой массы, близкой к массе мезотрона, то на долю электрона придется значительно меньше половины энергии мезотрона. В этом случае станет понятным отсутствие значительного количества электронов, обязанных своим происхождением электронам распада.

В заключение приношу благодарность Д. В. Скобельцыну за ценные указания при выполнении этой работы.

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

Поступило
21 XI 1939

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Д. В. Скобельцын и С. Н. Вернов, ДАН, XXVI, № 1 (1940).
- ² M. A. Romerantz a. T. H. Johnson, Phys. Rev., 55, № 11 (1939).
- ³ Г. Х. Франк-Каменецкий, ДАН, XXI, № 4 (1938). ⁴ Auger, Leprince-Ringuet et Ehrenfest, J. de Phys., 1936, sér. 7, t. 7, p. 58.
- ⁵ B. Rossi, International Conference on Physics, London, 1934, v. I, p. 233.
- ⁶ R. T. Young a. J. C. Street, Phys. Rev., 52, 552, 1937. ⁷ R. A. Millikan a. G. H. Cameron, Phys. Rev., 28, № 5 (1926); R. A. Millikan a. G. H. Cameron, Phys. Rev., 31, № 2 (1928); R. A. Millikan a. G. H. Cameron, Phys. Rev., 31, № 6 (1928). ⁸ J. Barnóthy a. M. Forró, Nature, 144, № 3637 (1939).