

Г. Х. ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ

О ВТОРИЧНОМ ИЗЛУЧЕНИИ, СОПРОВОЖДАЮЩЕМ ПРОНИКАЮЩЮЮ КОМПОНЕНТУ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

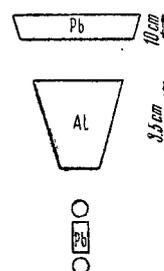
(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 5 X 1938)

Установлено, что в явлениях космического излучения мы имеем дело с двумя разнородными компонентами—мягкой (*M*) и проникающей (*D*). Особое внимание уделяется сейчас изучению свойств проникающей группы, приписываемой «тяжелым электронам». В частности существенный интерес представляет вопрос о механизме ливней, связанных с проникающей компонентой. Можно считать несомненным, что ливни эти вызываются главным образом вторичными электронами, возникающими при взаимодействии проникающих частиц с поглощающей средой. В составе мягкой группы приходится таким образом различать две части—первичную мягкую компоненту, генетически не связанную с жесткой, и вторичную, находящуюся в равновесии с проникающим излучением. Возникает вопрос, каково соотношение между этими двумя составляющими мягкой группы?

До последнего времени было принято предположение, что на уровне моря можно рассматривать обе компоненты *M* и *D* как независимые.

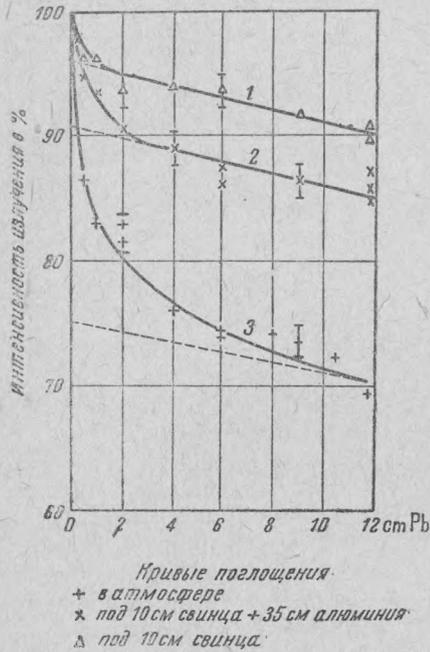
Однако такой вывод был сделан на основании лишь некоторых косвенных и скорее качественных данных. Как показывают новейшие исследования (1), такую гипотезу трудно привести в согласие с результатами лавинной теории. Эти исследования приводят к предположению, что на уровне моря по крайней мере значительная часть мягкой компоненты отвечает условиям равновесия. Только что Нильсен и Морган (2) опубликовали результаты измерений, которые непосредственно подтверждают это предположение. Что касается механизма возникновения вторичных электронов, то вопрос этот нельзя считать окончательно выясненным. Весьма вероятно, что в преобладающей части источником этих электронов являются процессы образования δ -лучей. Равновесное количество электронов, возникающих этим путем, может быть легко вычислено (см. ниже). Из сравнения такого расчета с данными измерений можно сделать определенные заключения о массе первичных проникающих частиц.

В связи с намеченными вопросами были проведены измерения методом Росси-Оже с целью оценки равновесной интенсивности мягкой группы и выяснения ее зависимости от атомного номера поглотителя.



Фиг. 1. — Расположение счетчиков и фильтров.

Над двумя счетчиками Гейгер—Мюллера* и на значительном расстоянии от них располагался фильтр из 10 см свинца, закрывавший



Фиг. 2.

весь телесный угол, выделяемый счетчиками (фиг. 1). Фильтр полностью устраняет мягкую группу, имеющуюся в атмосфере. Вводя слои свинца между счетчиками, можно было исследовать кривую поглощения проникающего излучения вместе с сопровождающим его мягким вторичным излучением, возникшим в свинце (кривая 1, фиг. 2). Введением 35 см алюминия между свинцовым фильтром и счетчиками можно было осуществить с некоторым приближением условия равновесия в алюминии и исследовать тем же способом кривую поглощения (кривая 2, фиг. 2). Кроме того была получена кривая поглощения нефильтрованного излучения (кривая 3, фиг. 2). Полученные кривые можно разложить на две составляющие, соответствующие мягкой и жесткой группам. Прямые, показанные на фиг. 2 пунктиром, дают ход кривой для проникающей компоненты, коэффициент поглощения которой известен**.

Пользуясь указанным разложением, можно непосредственно определить равновесную интенсивность мягкой компоненты (табл. 1)***.

Точность полученных оценок разумеется невелика в силу неизбежно

Таблица 1

	Атомный номер	Равновесная интенсивность мягкой излучения в % к проникающему
Свинец	82	4.5 ± 3
Алюминий . . .	13	11 ± 3
Атмосфера . . .	7	33 ± 3

значительного влияния статистических ошибок. Как показывает фиг. 2, разброс экспериментальных точек несколько превышает статистические флюктуации. Это очевидно вызывается незначительными изменениями чувствительности установки. Сопоставление кривых выявляет однако с полной отчетливостью следующий факт: равновесная интенсивность мягкой группы в легких средах существенно больше, чем в тяжелых

****. Можно отметить, что при отсутствии фильтра между счетчиками вторичное излучение, возникшее в алюминии, полностью компенсирует поглощение проникающей группы в 35 см алюминия.

* Счетчики имели латунные стенки 0.1—0.12 мм и стеклянные 0.5—1.0 мм. Наполнялись смесью воздуха и паров алкоголя.

** Коэффициент поглощения проникающей компоненты по наблюдениям различных авторов имеет значения в пределах $(4.5—6.5) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ свинца. Принятое здесь значение $\mu = 5.7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ свинца находится в наилучшем согласии с нашими измерениями.

*** Наличие 1—3% частиц с пробегами больше 6 см свинца в сильно поглощаемой части излучения в воздухе (кривая 3, фиг. 2) указывает на существование вторичных полутяжелых частиц.

**** Этот результат совпадает с результатом старых исследований переходных эффектов Шиндлера⁽³⁾ с помощью ионизационной камеры.

Интенсивность мягкой группы, возникающей за счет образования δ -лучей, может быть оценена непосредственно, пользуясь следующим принципом: энергия первичных частиц, преобразуемая в некотором слое dx в энергию вторичного излучения, должна равняться в случае равновесия энергии, затрачиваемой на ионизацию всеми теми ионизирующими частицами, которые образовались за счет этого вторичного излучения в том же слое dx^* .

$$nb = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \sigma(\omega) \omega d\omega. \quad (1)$$

Здесь n —число вторичных частиц, сопровождающих в равновесии одну проникающую; b —ионизационные потери на единицу длины; $\sigma(\omega)$ —вероятность того, что первичная частица образует вторичную с энергией ω на единице пути; ω_{\min} —минимальная энергия, при которой частица регистрируется; ω_{\max} —максимальная энергия, передаваемая вторичной частице. Этот способ расчета остается справедливым при любых превращениях вторичного излучения (лавинные процессы и т. п.). Ионизационные потери (рассчитанные на один атом) растут несколько медленнее атомного номера среды Z . Поэтому надо ожидать, что равновесная интенсивность вторичного излучения окажется возрастающей функцией Z , поскольку можно предполагать, что эффективные сечения процессов образования вторичных частиц (рассчитанные на один атом) либо пропорциональны Z (образование δ -лучей) либо растут быстрее Z .

Написанное выше общее соотношение (1) можно применить к δ -излучению, воспользовавшись формулой для вероятности образования δ -частиц «тяжелыми электронами», которую приводит Баба⁽⁵⁾ (на основе теории Моллера):

$$\sigma(\omega) d\omega = 2\pi a^2 m c^2 N \left[\frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1} \frac{\omega}{\omega_{\max}} + \frac{\omega^2}{2(\gamma^2 - 1)(Mc^2)^2} \right] \frac{d\omega}{\omega^2}. \quad (2)$$

Здесь $a = \frac{e^2}{mc^2}$; $\gamma = \frac{E + Mc^2}{Mc^2}$; m —масса покоя электрона; M —масса покоя первичной частицы; E —кинетическая энергия первичной частицы; N —число электронов в 1 см³.

После подстановки этого выражения в формулу (1) получаем следующее выражение для числа вторичных частиц:

$$n = \frac{2\pi a^2 m c^2 N}{b} \left[\frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1} \lg \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\max}} + \frac{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2}{4(\gamma^2 - 1)(Mc^2)^2} \right]. \quad (3)$$

Используя для расчета среднюю энергию частиц космического излучения $E = 3 \cdot 10^9$ eV и значение ионизационных потерь по Бетэ-Блоху $b = 14$ МэВ на 1 см свинца при энергии $\omega = 10^7$ eV, получаем следующие значения интенсивности вторичного излучения:

Таблица 2

Интенсивность вторичного излучения в свинце в % к проникающему**

Масса первичной частицы в электронных массах	1	100	200	500	1000
Интенсивность вторичного излучения в %	29	26	21	14	9

* Этот способ был указан Д. В. Скобельциным. В позднейшей работе Нордгейм⁽⁴⁾ пользуется таким же методом.

** Числа, приведенные в этой таблице, расходятся с результатами сложных вычислений самого Баба, что показывает несовершенство этих вычислений.

Сопоставление табл. 2 с полученным в работе значением 4.5% вторичного излучения в свинце приводит на первый взгляд к необходимости допустить очень значительные величины массы проникающей частицы (порядка 1000 m)*.

Однако поскольку, как установлено в этой работе, ход n с Z оказывается аномальным, такие выводы представляются неубедительными.

Истолкование полученной зависимости интенсивности вторичного излучения от Z представляет значительные затруднения. Отклонение от теоретически ожидаемой зависимости может быть отнесено за счет каких-то существенных аномалий в механизме поглощения вторичного излучения. Некоторое влияние может оказать рассеяние в свинце. Однако мало вероятно, чтобы рассеяние могло дать столь значительный эффект. Возможно предположить, что наблюдаемые отступления следует связать с обнаруженным Скобельциным и Степановой⁽⁸⁾ аномальным поглощением быстрых β -лучей.

Полученные данные не позволяют установить характера количественной зависимости n от Z .

Чтобы решить поставленный выше вопрос о доле вторичных частиц в мягком излучении в атмосфере, нужно было бы экстраполировать $n=f(Z)$ к $Z=7$. Поскольку налицо резкий скачок в величине n при переходе от $Z=13$ до $Z=7$ (табл. 1), можно заключить, что в составе нефльтрованного излучения имеется значительное количество мягких лучей, не зависящих от группы D . Однако надо учитывать возможность того, что величина n для алюминия преуменьшена. Здесь нужно учесть два обстоятельства. Во-первых, вторичная частица может не быть зарегистрирована в том случае, если она проходит через оба счетчика одновременно с первичной. Контрольными наблюдениями показано, что в случае свинца этот источник ошибок не сказывается. Алюминиевый же фильтр находился значительно ближе к счетчикам, чем свинцовый, и кроме того есть основания полагать, что «расходимость» вторичных частиц в алюминии существенно меньше, чем в свинце. Во-вторых, возможно, что 35 см алюминия недостаточны для достижения насыщения. Согласно непосредственным измерениям Нильсена и Моргана⁽²⁾ практически вся группа M — целиком вторичного происхождения. Если принять этот результат, то на основании полученных данных приходится заключить, что равновесная интенсивность при переходе от свинца к воздуху меняется в 7 раз (4.5 и 33%).

Настоящая работа была выполнена под руководством проф. Д. В. Скобельцина, которому автор выражает свою благодарность.

Физико-Технический институт.
Ленинград.

Поступило
10 X 1938.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. С. Иванова, ДАН, XX, № 7 (1938). ² W. Nielsen a. K. Morgan, Phys. Rev., 54, 245 (1938). ³ H. Schindler, ZS. f. Phys., 72, 625 (1931). ⁴ L. W. Nordheim, Phys. Rev., 53, 694 (1938). ⁵ H. J. Bhabha, Proc. Roy. Soc. (A), 164, 257 (1938). ⁶ I. G. Wilson, Nature, 142, 73 (1938). ⁷ P. A. Uger, C. R., 206, 346 (1938). ⁸ Д. В. Скобельцин, Изв. Акад. Наук СССР, сер. физич., 75 (1938).

* Аналогичным методом определяли массу проникающих частиц Вильсон⁽⁶⁾, экспериментальные данные которого хорошо согласуются с нашими, и Оже⁽⁷⁾, который получил значения вторичного излучения на разных глубинах под землей от 2 до 10%.