

О ПРИРОДЕ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ф. Гальперин, Москва

1. Еще со времени открытия космических лучей в 1911 г. Гессом и Кольгерстером в физике установилось представление об этих лучах, как о волновом излучении. Исторически первым аргументом в пользу такой природы космических лучей было то обстоятельство, что их проникающая сила в то время не очень сильно отличалась от силы проникновения γ -лучей. Но эту аргументацию нельзя считать веской, так как известно, что большой проникающей силой обладают также и быстро движущиеся электроны. В ряду других аргументов в пользу волновой природы космических лучей, чрезвычайно сильным аргументом был тот, что коэффициенты поглощения, вычисленные по формуле Дирака для волн, испускаемых при образовании в едином акте атомов гелия, кислорода, кремния и железа из атомов водорода они, эти коэффициенты, в пределах точности экспериментальных измерений, совпадали с коэффициентами поглощения соответствующих кривых, на которые Милликэн и Кэмерон разлагали экспериментальную кривую, показывающую зависимость ионизации атмосферы от глубины. На основании почти точного совпадения этих коэффициентов Милликэн и Кэмерон утверждали, что космические лучи есть квантовое излучение, сопровождающее образование вышеназванных сложных атомов из атомов водорода в едином акте, а не постепенным образом.* Вопрос о природе космических лучей можно было считать почти окончательно решенным в пользу их волнового характера.

* Ср. Милликэн и Кэмерон.

но он снова был поставлен последними работами Боте и Кольгерстера. В своих опытах со счетчиками Гейгера-Мюллера они подсчитывали число совпадений в электрометрах, связанных с этими счетчиками, т. е. число одновременных прохождений космического луча через оба счетчика, и это число оказалось очень большим. Этот результат, по мнению авторов, доказывает, что в этих опытах они имели дело с корпускулярным излучением. Получив коэффициент поглощения последнего почти равный коэффициенту поглощения космических лучей Боте и Кольгерстер окончательно утвердились в заключении, что космические лучи обладают корпускулярной структурой и представляют собой поток быстро движущихся космических электронов. Важно отметить, что такая электронная природа космического излучения исключает те предположения, которые строил Милликэн относительно происхождения космических лучей, ибо согласно известному уравнению Эйнштейна $mc^2 = E$ при атомных образованиях за счет дефекта массы испускается волновое излучение. Космические электроны при подобных процессах испускаться не могут, и если бы взгляды Боте и Кольгерстера на природу космических лучей оказались правильными, то ясно, что они автоматически повлекли бы за собой и отказ от построений Милликэна о происхождении этих лучей. Реферлируемые в этой статье экспериментальные и теоретические работы посвящены новым доказательствам волновой природы космических лучей.

2. Основная мысль последних опытов (1929—1930 гг.) Милликэна заключается в следующем: если космические лучи действительно суть поток космических электронов, движущихся с большими скоростями (что следует из предположений Боте и Кольгерстера), то эти электроны должны заметно отклоняться в магнитном поле земли и притом неодинаково в разных ее местах: в местах близких к полюсам сильнее, в более отдаленных от полюсов — слабее. Поэтому на разных географических широтах при такой трактовке природы космических лучей интенсивность последних должна быть разной. Имея в своем распоряже-

нии электроскоп более совершенный и в два раза более чувствительный, чем электроскоп, которым производились опыты в 1928 г., Милликэн непрерывно, днем и ночью с 26/VII по 3/VIII 1930 г. в Пасадене (Pasadena), на широте 34° и с 25/VII по 1/IX 1930 г. в Черчилле (Churchill) на широте 59° измерял интенсивность космических лучей. Результаты этих измерений, опубликованные в „The Physical Review“, декабрь 1930 г. показывают почти *одинаковую* среднюю интенсивность — в Пасадене 26·30 ионов в $см^2$ в секунду, в Черчилле 28·31 ионов в $см^2$ в сек. Ошибку в этих измерениях Милликэн оценивает не больше как 10%. Из этих данных Милликэн выводит, во-первых, что космические лучи проникают в земную атмосферу как электромагнитное излучение, а не как электроны и, во-вторых, так как участок неба, из которого лучи проходят в Черчилль, совершенно отличен от того, из которого лучи поступают в Пасадену, что космические лучи поступают на землю равномерно со всех участков неба. Далее, Милликэн доказал экспериментально независимость интенсивности космических лучей от положения на небе Млечного пути. В течение двух недель, измеряя интенсивность этих лучей в Пасадене, Милликэн заметил, что она проходит через свой максимум после полудня (табл. I).

ТАБЛИЦА I

Интенсивность космических лучей
(в таблице приведены только средние числа)

| | Ночью | Утром | После полудня | Вечером |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Июль 14—19, 1930 . . | 29,71 | 29,73 | 30,39 | 29,39 |
| Июль 19—27, 1930 . . | 29,74 ¹ | 29,78 ² | 30,21 ³ | 30,12 ⁴ |
| Октябрь 6—12, 1929 . | 29,98 ⁵ | 30,07 ⁶ | 30,63 ⁷ | 30,37 ⁸ |

1. Млечный путь над головой в течение всего времени. 2. Млечный путь над головой большую часть этого времени. 3. Млечный путь совершенно не виден. 4. Млечный путь частично над головой. 5. Млечный путь над головой большую часть этого времени. 6. Млечный путь совершенно не виден. 7. Млечный путь частично над головой. 8. Млечный путь над головой в течение всего времени.

Интенсивности выражаются в ионах в куб. сантиметрах в секунду. В таблице не принимается во внимание поправка на ионизацию в электроскопе, производимую проходящими через свинцовый щит электроскопа лучами местного радиоактивного происхождения. Милликен сначала предполагал, что этот максимум интенсивности связан с положением Млечного пути на небе, но скоро сам установил, что это не так; табл. I это показывает. В данных от 19/VII—27/VII 1930 г. интенсивность проходит через свой максимум после полудня (afternoon), когда Млечный путь совершенно не виден на небе. Таково же положение Млечного пути на небе утром (см. измерения от 6/X по 12/X 1929 г.) и однако максимальная интенсивность космических лучей опять падает на после полудня. Вывод Милликена отсюда таков, что Млечный путь не оказывает какого бы то ни было влияния на интенсивность космических лучей и что поэтому последние должны происходить в „глубинах пространства вне Млечного пути“. Действительное же объяснение этого поведения космических лучей—в изменениях, происходящих в атмосфере. Когда солнце восходит и начинает греть землю, воздух начинает расширяться и подниматься вверх. В атмосфере образуется нечто вроде дыры, через которую космические лучи после полудня (к этому времени земля больше всего нагрета) проходят с наибольшей интенсивностью.

3. Также доказательству несовместимости электронной природы космических лучей с опытными наблюдениями над нами посвящена математическая работа П. Эпштейна, напечатанная в „Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA“ за октябрь 1930 г. Эпштейн принимает энергию космических электронов в 10^9 V, значение взятое им у Росси (Rossi), последователя Боте и Кольгеффера. Целым рядом математических выкладок, которые мы здесь не приводим из-за их громоздкости, Эпштейн доказывает, что космические электроны, обладающие такой энергией, могут приходить на землю только в двух вполне ограниченных зонах вокруг магнитных полюсов земли.

Практически же все места земли, где космические лучи наблюдаются, лежат вне этих зон. Это ведет, по мнению автора этих рассуждений, к следующим трем возможностям: 1) космические лучи суть электромагнитные волны, 2) они суть корпускулярные лучи, но чтобы они попадали в те места земли, где практически наблюдались космические лучи, они должны обладать значительно большей энергией, чем 10^9 V (по крайней мере 6.10^{10} V) 3) они земного, некосмического происхождения.

4. Кривая, изображающая зависимость ионизации атмосферы от глубины, полученная Милликэном и Кэмероном в 1928 г., страдала двумя пороками, во-первых, она давала ионизацию для глубин ниже „верхушки“ атмосферы, в поглотительном отношении равных столбу воды высотой не более 67 м; на больших глубинах аппараты этих исследователей оказывались нечувствительными для обнаружения излучения такой большой проникающей силы, вместе с тем в 1928 г. уже были произведены опыты Регенером на более значительных глубинах, во-вторых, верхняя часть упомянутой кривой соответствовала излучению с коэффициентом поглощения 0,35 на метр воды, тогда как на уровнях, соответствующих верхней части этой кривой, по мнению Милликэна, должно наблюдаться излучение, сопровождающее образование гелия из атомов водорода в одном акте, а для этого излучения вычисленный коэффициент поглощения по формуле Дирака равняется 0,30 на метр воды. Эти два обстоятельства вызвали новые опыты Милликэна и Кэмерона с целью усовершенствовать кривую зависимости ионизации от глубины, как в нижней (для больших глубин ниже верхушки атмосферы), так в верхней (для больших высот над уровнем моря) ее частях. Для обнаружения слабых эффектов на больших глубинах под водой и для усиления чувствительности был сооружен новый сферический электроскоп. Внутренний объем его равен 1622 см³, внутреннее давление — около 30 атм. Толщина его стальных стенок 3 мм. Емкость электроскопа 0,979 электростатических единиц. Давление в нем держалось два года без следа уменьшения. Изоляционная кварцевая под-

ставка была настолько хороша, что потенциал за четыре часа уменьшался только на 0,5 вольт с 226,5 до 226,0 вольт. Для наблюдений над землей электроскоп был окружен свинцовым щитом толщиной в 7,64 см. Чувствительность электроскопа увеличена таким образом в два раза в сравнении с чувствительностью этого прибора в 1928 г. Этот электроскоп изображен на рис. 1.

Электроскоп в течение летних месяцев 1928—1929 гг. опускался в два озера: Арроухид, высота над уровнем моря 5100 фут. и Джем высота 9120 фут. Наибольшая глубина под водой, на которую опускался электроскоп,

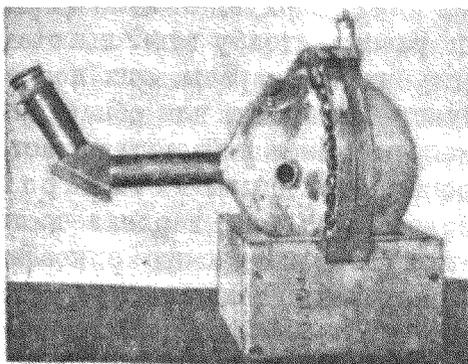


Рис. 1.

была равна 72,6 м. С учетом атмосферного столба над поверхностью озера, это составляет 80 м воды ниже „верхушки“ атмосферы. На этой глубине еще замечалась ионизация в приборе, в среднем равная 2 ионам в куб. сантиметрах в секунду. Не принимались во внимание данные, относящиеся к глубинам погружения электроскопа

меньшим, чем 0,85 м, и таким образом исключалось в ионизации участие радиоактивных лучей, идущих из скал и почвы, окружающих озеро. С учетом поглощения атмосферного столба над поверхностью озера этот наивысший уровень погружения электроскопа находился на 8,25 м воды ниже „верхушки“ атмосферы. На этом уровне наблюдаемая ионизация составляла 64,1 ионов в куб. сантиметрах в секунду. С другой стороны, этим же электроскопом в течение летних месяцев 1928—1929 и 1930 гг. производились наблюдения на вершине пика Пайка (14 тыс. фут. над уровнем моря). Наблюдалась ионизация в приборе один раз, когда он был окружен свинцовым щитом, другой раз — без щита. Зная из предварительных опытов, что через свинец прохо-

дит 2,4% лучей местного радиоактивного происхождения, легко было определить ионизацию, производимую только космическими лучами. Число лучей местного происхождения можно найти вычитанием из ионизации на данном уровне, полученной когда электроскоп окружен щитом ионизации для того же уровня, взятой из данных для измерений под водой. Наибольшая высота подъема электроскопа составляет 6,195 м воды ниже поверхности атмосферы, тогда как в 1928 г. она была около 8 м воды.

Милликэн и Кэмерон придают очень большое значение для вопроса о происхождении и природе космических лучей тому, что в этот раз удалось так расширить кривую зависимости ионизации от глубины в ее верхней части. Как раз на больших высотах обнаружилось до сих пор наибольшее расхождение между теорией и опытными данными.

Анализ кривой построенной по результатам подводных и надземных измерений показывает, во-первых, что даже слой воды толщиной в 80 м не поглощает все космические лучи. В точке кривой, соответствующей глубине в 80 м, кривая продолжает опускаться. Милликэн и Кэмерон указывают, что для определения нуля электроскопа, т. е. ионизации (когда все внешние лучи поглощены), и коэффициента поглощения этих жестких лучей они анализировали эту кривую с помощью таблиц Гольда и нашли, что если нулем электроскопа являются 1,2 иона в см^3 в секунду, и коэффициент поглощения составляет 0,028 на метр воды, то хорошо воспроизводится полученная экспериментальная кривая в интервале от 40 до 80 м воды. Из существования такого коэффициента поглощения вытекает, что даже на глубине 180 м воды еще может очень чувствительными инструментами обнаруживаться ионизация в 0,03

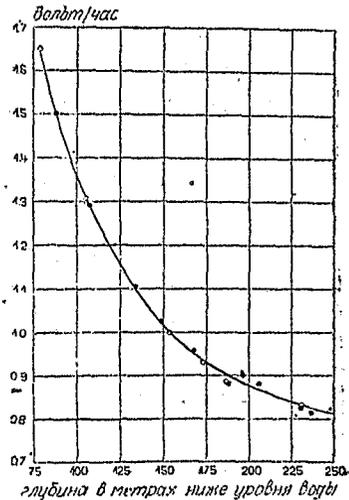


Рис. 2.

ионов в куб. сантиметрах в секунду. Проникающая сила лучей, производящих ионизацию на такой глубине, в два раза больше той, которая до сих пор Милликэном и Кэмероном прямо наблюдалась. Этот результат хорошо согласуется с измерениями Регенера, произведенными им при действительном опускании аппарата на такую глубину.

Во-вторых, коэффициент поглощения, соответствующий верхнему концу кривой, полученной из данных для подводных измерений, равен 0,27 на метр воды, тогда как для кривой 1928 г. этот коэффициент, полученный из непосредственных наблюдений, равен 0,22 на метр воды, т. е. он больше, а не меньше.

И-в-третьих, новая кривая так же, как кривая 1928 г. обнаруживает полосатую структуру. По просьбе Милликэна и Кэмерона, Боуэн построил кривую из четырех компонент, которая изображала ту же зависимость ионизации атмосферы от глубины, как и экспериментальная кривая. Табл. II дает сравнение ионизаций, даваемых синтетической кривой Боуэна и экспериментальной кривой Милликэна и Кэмерона.

ТАБЛИЦА II

Сравнение наблюдаемой кривой с кривой, построенной синтетически

| Глубина в метрах | Вычислен- ная | Наблюден- ная | Разность |
|---------------------|------------------|------------------|----------|
| 7,5 | 89,7 | 90,8 | 1,1 |
| 8,0 | 70,6 | 70,6 | 0 |
| 9 | 48,2 | 48,1 | 0,1 |
| 10 | 37,1 | 36,9 | 0,2 |
| 12 | 26,4 | 26,5 | 0,1 |
| 15 | 19,1 | 19,1 | 0 |
| 20 | 12,53 | 12,55 | 0,02 |
| 25 | 8,87 | 8,75 | 0,12 |
| 30 | 6,58 | 6,56 | 0,02 |
| 40 | 3,93 | 3,83 | 0,10 |
| 50 | 2,49 | 2,62 | 0,13 |
| 60 | 1,63 | 1,88 | 0,25 |
| 70 | 1,11 | 1,29 | 0,18 |
| 80 | 0,74 | 0,80 | 0,6 |

Четыре коэффициента поглощения, из которых построена синтетическая кривая, суть следующие: 0,03, 0,10, 0,20 и 0,80.

Далее, Милликэн и Кэмерон сравнивают эти коэффициенты с коэффициентами, вычисленными из формулы Клейна-Нишины, уравнения $mc^2 = E$ и кривой Астона для случаев образования атомов гелия, кислорода, кремния и железа из атомов водорода в одном акте. Формула Клейна-Нишины, дающая возможность вычислять коэффициент абсорбции для очень жестких лучей, имеет вид:

$$\mu = \frac{2\pi N e^4}{m \cdot c^4} \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \log(1+2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \log(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\},$$

где $\alpha = \frac{h\nu}{mc^2}$, N — числу электронов. Значения α , найденные при помощи данных Астона, следующие:

| | |
|--------|------|
| H → He | 52,9 |
| H → O | 227 |
| H → Si | 423 |
| H → Fe | 876 |

Табл. III дает сравнение эмпирических коэффициентов с найденными теоретически таким способом:

ТАБЛИЦА III
(в метрах глубины)

| Вычисленная | Наблюденная |
|-------------|-------------|
| 0,1957 | 0,80 |
| 2409 | 20 |
| 1418 | 10 |
| 0754 | 0,28 |

Наблюденными коэффициентами Милликэн и Кэмерон называют коэффициенты синтетической кривой Боуэна. Милликэн и Кэмерон считают чрезвычайно важным для подтверждения их теории происхождения космических лучей, что для гелиевого излучения, наиболее характерного для этих лучей, имеющего около 90% всей их энергии, вычисленный и наблюдаемый коэффициенты погло-

щения почти полностью совпадают. Что же касается все-большого расхождения между этими коэффициентами по мере перехода к более проникающему излучению (больше всего эти коэффициенты различаются для излучения, соответствующего образованию $H \rightarrow He$), то Милликэн и Кэмерон также не считают это затруднением для своей теории и это расхождение объясняют следующим образом.

Когда луч фотонов-квантов энергии попадает в атмосферу, то, в силу комптоновских встреч этих фотонов с электронами молекул воздуха, образуются вторичные, третичные и т. д. компоненты первичного космического луча. По прохождении определенного количества материи наступает равновесие луча с его вторичными компонентами. Это состояние равновесия будет достигнуто, когда в луче за счет поглощения первичных образуется в секунду столько же вторичных компонентов, сколько вторичных поглощается за это время. Коэффициент поглощения луча после достижения этого равновесия будет такой же величины, как коэффициент поглощения луча, когда он впервые достигает атмосферы, так как в равновесном луче процентное содержание вторичных во все время движения луча не изменяется, меняется только количество первичных, но это как раз то состояние, в котором находятся лучи, когда они впервые достигают материи. До достижения равновесия коэффициент поглощения луча должен быть меньше коэффициента поглощения первичного луча; то, что для гелиевого излучения вычисленный и наблюдаемый коэффициенты поглощения почти совпадают, позволяет предполагать, что на тех уровнях, на которых наблюдается космическое излучение, соответствующее образованию гелия из водорода, оно, это излучение, находится в равновесном состоянии. Милликэн и Кэмерон предполагают, что при измерении ионизации, производимой более проникающими лучами, они имели дело с неравновесными излучениями, чем и объясняется, что наблюдаемый коэффициент поглощения меньше вычисленного. Мы со своей стороны считаем, что это только качественные соображения, ни в какой мере не объясняющие

такое серьезное количественное расхождение, какое наблюдается для образования $H \rightarrow Fe$.

Из этих соображений вытекает, что коэффициент поглощения проходит через свой максимум где-нибудь ниже поверхности атмосферы. Это находится в хорошем согласии с измерениями интенсивности космических лучей на высоте 15,5 км Милликэном и Кэмероном в 1922 г., с одной стороны, и Гессом и Кольгерстером на высоте 9 км, с другой стороны. Известно, что первые исследователи получили коэффициент поглощения в четыре раза меньший, чем то, что получили Гесс и Кольгерстер. Эти данные долгое время казались противоречивыми, но сейчас, в связи с развитыми выше соображениями, это понятно и объясняется тем, что коэффициент поглощения имеет свое максимальное значение где-нибудь между 9 и 15,5 км и по мере приближения к последнему уровню уменьшается, принимая значение, полученное для него Милликэном и Кэмероном в 1922 г. Такое поведение коэффициента поглощения, как и величины ионизации космическими лучами, максимум которой не находится на поверхности атмосферы, а ниже ее, еще раз доказывает, что космические лучи вступают в атмосферу как электромагнитное, а не как корпускулярное излучение.

Милликэн и Кэмерон между прочим отмечают, что формулу Клейна — Нишины нужно считать только приближенной формулой для определения коэффициента абсорбции космических лучей. Согласно этой формуле поглощение космических лучей пропорционально числу внеядерных электронов. Но однако кривая зависимости ионизации от глубины ясно доказывает, что в поглощении космических лучей принимают участие и ядра. Если справедлив закон массовой абсорбции, т. е. закон зависимости ионизации от плотности, то водяной эквивалент свинца, окружающего электроскоп, равняется 0,85 м. Получается он умножением толщины свинца на плотность последнего. Действительный же водяной эквивалент этого свинцового щита для слабо проникающих космических лучей получается из расстояния по оси x между верхними частями обеих кривых (рис. 1)

и он равняется 122 см. Для более проникающих лучей это расстояние между кривыми увеличивается, и на высоте 10 м над уровнем моря водяной эквивалент свинца равняется 170 см. Это подтверждает влияние ядер на абсорбцию космических лучей. Чао, недавно осветив сходное поведение γ -лучей, таким образом еще раз подтвердил идентичность природы космических и γ -лучей.

Новые опыты Регенера, произведенные им зимою 1929/30 г. и летом 1930 г., результаты которых опубликованы в „Nature“ № 3198 1931 г., прежде всего доказывают, что уменьшение ионизации на больших глубинах под водою (236,5 м) не объясняется уменьшением радиоактивности воды по мере приближения ко дну озера. Для этой цели ионизационная камера была окружена чаном диаметром в 2,5 м, который наполнялся водой с поверхности озера. Когда аппарат опускался на большие глубины, ионизационная камера была таким образом окружена постоянным слоем воды в 1 м. Этот слой защищал камеру от радиоактивности окружающей воды. Результаты, полученные в этот раз, находились в полном согласии с кривой 1928 г., которая была получена Регенером без этого защитного чана. Рис. 2 изображает кривую зависимости ионизации от глубины, полученную в 1930 г. для глубин больших 75 м под водой. Данные, полученные без защитного чана, обозначены кружками, с чаном — черными точками.

Летом 1930 г. эти результаты были проверены еще раз с помощью счетчиков Мюллера-Гейгера, которые опускались на разные глубины и действовали на электрические часы, циферблат которых автоматически фотографировался в известные моменты времени. Кривая поглощения космических лучей, полученная этим способом, и кривая, полученная ионизационным методом, находятся в хорошем согласии для глубин под водою в 7 м и больше. Для глубин, более близких к поверхности озера, они, эти кривые, расходятся, число отчитанных импульсов счетчиками меньше, чем должно быть для полного согласия кривых на этих глубинах и это, вероятно, объясняется механическим и электрическим отставанием регистрирующих приборов. Кривая была

анализирована сотрудником Регенера Крамером и разложена на четыре компоненты. Относительные интенсивности проникновения атмосферы трех самых жестких из этих компонент суть 0,81 : 6,4 : и 16,35. Самое жесткое излучение имеет последнюю интенсивность. Коэффициенты абсорбции суть 0,020, 0,073 и 0,21 на метр воды. Четвертая компонента с наибольшей длиной волны не могла быть вычислена.

Регенер вычисляет из формулы Клейна — Нишины длину волны самого жесткого излучения и находит, что она равняется $0,63 \times 10^{-13}$ см. Он предполагает, что это излучение происходит при полном превращении протона и электрона в излучении, длина волны которого $1,313 \times 10^{-13}$ см, то, что самое жесткое космическое излучение может быть объяснено превращением протона и электрона в излучение тоже служит подтверждением, а не опровержением волновой природы космических лучей.