

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Физ101

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Л. Мысовский, Ленинград

Вопрос о природе космических лучей в связи с последними работами, в которых изучались отдельные импульсы проникающей радиации, вновь приковал к себе внимание широких научных кругов. Чтобы критически оценить результаты новейших работ в этой области, остановимся вкратце на представлениях о природе космических лучей, господствовавших в физике до самого последнего времени, и разберем аргументы, которые приводились в их защиту. Так как по своей проникающей способности космические лучи ближе всего подходят к гамма-лучам радиоактивных элементов, то еще с момента открытия космических лучей Гессом в 1911 г. они были признаны разновидностью лучистой энергии. Однако непосредственных опытов, которые могли бы доказать квантовую природу космических лучей, поставить не удалось. Еще меньший успех, до самого последнего времени, имели предпринятые некоторыми исследователями попытки доказать противоположную гипотезу о корпускулярном строении этих лучей. Но если не было прямых доказательств в пользу гипотезы о квантовой природе космических лучей, то число косвенных с течением времени увеличивалось, и одно время могло казаться, что квантовую гипотезу можно отнести в разряд достоверных завоеваний физической науки. Одним из доказательств квантовой природы космического излучения могло бы служить отсутствие отклонения в сильном магнитном поле.

Создать такое магнитное поле лабораторными средствами нечего было и думать. Несколькими авторами была высказана мысль, что, если для исследования космических лучей нельзя применить искусственного магнитного поля, то можно ожидать в случае корпускулярного строения космического излучения отклонения его в магнитном поле земли. Опыты Мысовского и Туви́ма¹ по изучению направления космических лучей, произведенные ими на водонапорной башне Политехнического института в Ленинграде, показали, что интенсивность этих лучей не зависит от азимута. Это обстоятельство несомненно говорило в пользу квантовой природы космического излучения. К тому же заключению об отсутствии влияния магнитного поля земли на направление космических лучей пришли Милликэн и Кэмерон, сравнивая интенсивности на различных широтах. Милликэн и Кэмерон² были настолько уверены в квантовой природе космического излучения, что говорили уже об отдельных линиях спектра. Рассматривая кривую Астона, полученную на основании его работ с масс-спектрографом, и пользуясь соотношением Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии $E = Mc^2$, они путем весьма остроумных рассуждений приходят к заключению, что постепенный распад атомов, подобный обычному радиоактивному распаду, не может дать того количества энергии, которое мы наблюдаем в космическом луче. Для объяснения различных коэффициентов поглощения и связанных с ними квантов $h\nu$ лучистой энергии — линий спектра — Милликэн и Кэмерон считают необходимым предположить существование в природе не только распада, но и образования атомов. Внезапным образованием из протонов, гелия, кислорода, кремния и железа и происходящей при этом потерей части массы, превращающейся в лучистую энергию (дефект массы), объясняются замеченные ими компоненты космических лучей. Воззрения Милликэна и Кэмерона в настоящее время уже

¹ L. Mysowsky und L. Tuwim. Z. Physik 36, 615, 1926.

² Ср. Милликэн и Кэмерон, Усп. физич. наук 9, 1, 1929.

нельзя считать исчерпывающими, так как вскоре после напечатания заключительной статьи Милликэна и Кэмерона появилась весьма тщательно сделанная работа Регенера,¹ значительно расширявшая наши представления о пределах жесткости космических лучей. Работа эта настолько интересна, что мы считаем необходимым подробнее остановиться как на экспериментальной ее части, так и на выводах, сделанных Регенером. Установка, которой пользовался Регенер при своих опытах на Боденском озере, изображена на рис. 1.

В качестве ионизационной камеры регистрирующего аппарата была взята стальная бомба с толщиной стенок в 1 см и объемом в 39 л. Для усиления ионизационного тока бомба была наполнена углекислотой при давлении в 30 атмосфер. Центральный электрод камеры соединялся с одно-

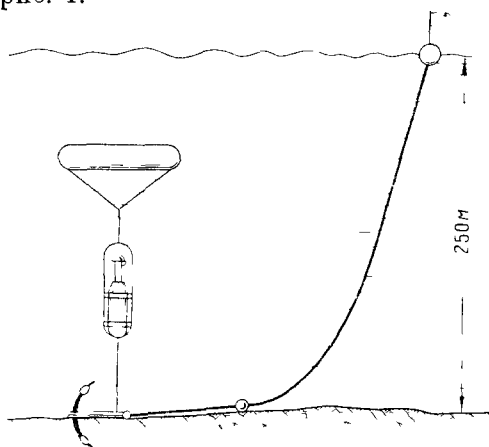


Рис. 1

нитным электрометром специальной конструкции. Перед погружением всей установки в воду электрометр заряжался до 600 V. Включая каждый час на несколько секунд освещение можно было получать и фиксировать изображение нити электрометра на фотографической пластинке. Ионизационный ток мог быть определен при помощи полученной фотографии с точностью до 0,01 V. Остаточный ток (собственное излучение камеры), благодаря оцинкованной поверхности и тщательной очистке и просушке углекислого газа, наполнявшего камеру, был сведен к мини-

¹ E Regener Naturwiss 17, 183, 1929

муму. На рис. 2 приведены записи регистрирующего прибора на различных глубинах.

Этот рисунок столь наглядно показывает уменьшение ионизационного тока с глубиной, что дальнейшие пояснения являются уже излишними. Интересно отметить какие предосторожности были приняты Регенером, чтобы обеспечить правильную работу установки на большой глубине. Из рис. 1 видно, что ионизационная камера с прикреплен-

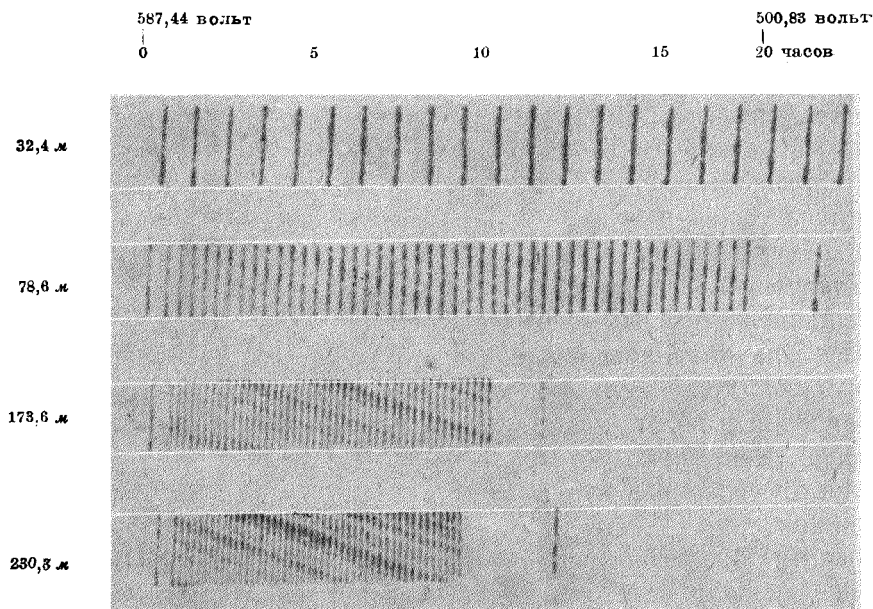


Рис. 2

ной к ней в верхней части электрометром поддерживалась в вертикальном положении при помощи поплавка. Волнение на поверхности озера не отражалось на работе электрометра, так как вся установка прикреплялась не к канату, спущенному с поверхности, а к якорю на дне озера. Результаты измерений, полученные Регенером, видны уже из рис. 2, но кроме того эти же результаты сведены в следующей таблице:

Глубина в м	Ионизац. ток V/час
32,4	3,55
78,6	0,87
105,2	0,53
153,5	0,22
173,6	0,15
186,3	0,106
230,8	0,051

Наиболее интересным в работе Регенера является то обстоятельство, что ему удалось подметить постепенное уменьшение интенсивности космических лучей в воде вплоть до глубины 230 м, в то время как Милликэн и Кэмерон не пошли дальше 70 м. При такой проникающей способности даже энергии образования атомов из протонов будет недостаточно для объяснения наиболее жесткой части космического излучения. При образовании атомов железа, кремния, кислорода и гелия из протонов только часть массы исчезает (дефект массы), превращаясь в лучистую энергию. Регенеру для объяснения крайнего предела жесткости пришлось предположить, что где-либо в природе происходят процессы, при которых вся масса протона целиком переходит в лучистую энергию. Таким образом гипотеза Милликэна и Кэмерона оказалась уже не в состоянии объяснить всего комплекса космических лучей. Эту гипотезу пришлось расширить введением новой составляющей — новой линии, зависящей от превращения протонов в лучистую энергию. Такое расширение, конечно, несколько не поколебало уверенности в оптической природе космических лучей. Даже наоборот. Возможность объяснить крайний предел жесткости космических лучей с точки зрения оптической гипотезы могло только еще более увеличить питаемое к ней доверие. Мы закончим перечень доказательств, относящихся к оптической гипотезе космической радиации, остановившись еще на одном своеобразном явлении, которое до последнего времени являлось сильным аргументом в пользу этой гипотезы. Известно, что

для жестких гамма-лучей коэффициент поглощения в различных элементах выражается формулой

$$\mu = \rho \frac{N}{A} Z \mu_e,$$

где ρ — плотность вещества, $\frac{N}{A}$ — число атомов в грамме вещества (N — число атомов в грамм-атоме, A — атомный вес), Z — число электронов в атоме и μ_e — коэффициент поглощения, рассчитанный на один электрон. Таким образом, на основании вышеприведенной формулы можно сказать, что поглощение гамма-лучей каким-либо слоем любого вещества пропорционально числу электронов в этом слое. Тот же закон поглощения оказывается справедливым и для космических лучей. Уже одно это обстоятельство может служить аргументом в пользу оптической природы космического излучения. Еще более убедительный аргумент в таком же направлении дало изучение поглощения космических лучей на границе двух сред, например воздуха и свинца. Оказывается, что при переходе из воздуха в свинец коэффициент поглощения космических лучей не сразу получает то значение, которое он должен был бы иметь по приведенной формуле. Для тонких слоев свинца не больше 5 — 6 см коэффициент получает значительно большее значение, чем ему следует быть по формуле, и лишь после 7 см поглощение происходит правильно, пропорционально числу электронов в единице объема. Аномальное поглощение космических лучей в переходном слое было открыто Гофманом и подтверждено его учеником Штейнке. Мысовский и Тувим¹ производили опыты по поглощению космических лучей тонкими слоями свинца в ледяном монолите и показали, что аномальное поглощение нельзя объяснить примесью к космическим лучам более мягких гамма-лучей из окружающего пространства. Оставалось предположить, что в каждом пучке космических лучей имеется некоторое количество более мягких вторичных лучей, образовавшихся при поглощении первичного

¹ L. Mysowski und L. Tuwim. Z. Physik 50, 273, 1928.

пучка. При переходе из воздуха или изо льда в свинец характер поглощения мягких вторичных лучей резко меняется. В то время как в воздухе и в воде поглощение даже мягких вторичных лучей происходит главным образом путем рассеяния (Комптон-эффект), в свинце для этих же лучей преобладает „истинное поглощение“ (фото-эффект). До тех пор пока наши знания о природе космических лучей ограничивались приведенными здесь фактами, существовала почти полная уверенность в том, что космические лучи представляют собой кванты лучистой энергии. Квантовая гипотеза не только объясняла вполне удовлетворительно все известные свойства космических лучей, но давала, как мы уже видели, возможность, пользуясь соотношением Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии, построить гипотезы и об их происхождении. Вопрос шел уже об отдельных линиях спектра и о максимальной энергии кванта. На основании данных Регенера, предельная энергия кванта космических лучей должна была быть больше 500 миллионов вольт. Мы увидим, однако, что новые гипотезы о природе космических лучей, основанные на новых данных, хотя и дают для максимальной энергии космического луча почти ту же величину, но каждый отдельный луч, поскольку его удается наблюдать, оказывается уже не квантом, а корпускулой.

Состав космической радиации по воззрениям Д. В. Скобелъцына

Взгляды Д. В. Скобелъцына на природу космических лучей еще не слишком радикально отличаются от прежних. Первичным лучам он попрежнему приписывает оптическую природу и полагает, что те „ультра-бета-лучи“, которые ему приходилось наблюдать, представляют собой вторичные электроны, освобожденные квантами космических лучей. Отдельные импульсы космических лучей удастся в настоящее время выделить двумя путями: 1) при помощи камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле и 2) при помощи двух счетчиков Гейгера и Мюл-

лера. Скобельцын работал по первому из указанных способов.¹ В статье об усовершенствовании методов наблюдения альфа и бета-частиц² мы уже говорили о том, что Скобельцын, изучая электроны, вызванные гамма-лучами в камере Вильсона, и применяя при фотографировании этих путей магнитное поле, заметил, что весьма небольшой процент путей сохраняет свою прямолинейность, даже при наличии поля напряжением в 1500 гаусс. Скобельцын рассматривает эти электроны как комптоновские, вызванные квантами космических лучей. В вышеупомянутой статье приведен также и один из стереоскопических снимков Скобельцына, на котором ясно виден прямолинейный путь электрона среди криволинейных путей комптоновских электронов от гамма-лучей. Здесь мы обратим внимание на одну особенность, отмеченную Скобельцыным на имеющихся в его распоряжении снимках. Из 613 стереоскопических снимков, которые были им получены в магнитном поле, электроны с „очень большой скоростью“ встречаются на 27. Среди этих последних на трех снимках прямолинейные пути оказались двойными, а на одном замечена была даже группа, состоявшая из трех прямолинейных путей. Такой большой процент почти параллельных путей не может быть объяснен случайностью. Приходится предположить, что пути, принадлежащие к одной и той же группе, выходят из одного общего центра. Предположение это было проверено Скобельцыным при помощи стерео-компаратора Пульфриха и вполне подтвердилось. На рис. 3 приведен один из снимков с двумя прямолинейными путями, которые даже на глаз кажутся выходящими из общего центра.

Данные, полученные при помощи стерео-компаратора, показывают, что эти два пути действительно можно рассматривать как выходящие из одного общего центра, если принять, что они претерпели небольшое отклонение в $2^\circ - 3^\circ$, при прохождении через стеклянную крышку камеры.

¹ D. Skobelzyn. Z. Physik 54, 686, 1929.

² Л. Мысовский. Успехи физич. наук 9, 574, 1929.

Чем же можно объяснить возникновение таких групп быстрых электронов? Скобельцын в своей статье делает предположение, что здесь мы имеем дело с расщеплением атома квантом космических лучей. В этом случае вместо пути электрона можно ожидать путь быстрой Н-частицы. Это предположение как будто подтверждается при внимательном рассмотрении рис. 3. Нижний прямолинейный путь имеет более густое распределение ионов, чем верхний, и более густое, чем у соседних комптоновских электронов. К сожалению нельзя привести еще одного рисунка, находящегося в статье Скобельцына и также содержащего два прямолинейных пути. Дело в том, что один из этих путей настолько слабо выражен на отпечатке, что

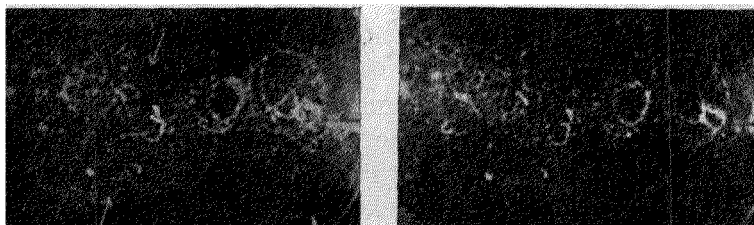


Рис. 3

вторичная репродукция наверное окончилась бы неудачей и вызвала бы лишь сомнения в наличии такого пути. Нужно сказать, однако, что два последних пути, о которых шла речь, не сходятся в одной точке. Скобельцын объясняет это отклонением, имевшим место в стеклянной крышке камеры или в медном цилиндре, на который была намотана проволока катушки, служившей для создания магнитного поля.

Хотя Скобельцын и остается на почве квантовой гипотезы о природе космических лучей, но все же его взгляды представляют значительный сдвиг в сторону корпускулярной теории. По воззрениям Скобельцына почти вся ионизация, вызываемая космическими лучами, обязана электронам предельной скорости — ультра-бета лучам. Свои соображения он подтверждает подсчетом числа

ионов, образованных быстрыми электронами в камере Вильсона. В основу этих расчетов Скобельцын кладет общее число своих снимков — 613, общее число прямых путей — 32, число ионов, образующихся на протяжении в 1 см пути при предельной скорости бета-частиц — 40, продолжительность явления в камере Вильсона — 0,02 сек, и наконец, объем освещенной части камеры. В результате подсчета он получает, что в 1 см³ в 1 сек образуется около одного иона. (По Милликену и Камерону 1, 4 J).

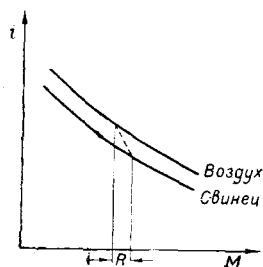


Рис. 4

Если же принять во внимание, что наблюдения производились им в первом этаже лаборатории Ленинградского Политехнического института и, следовательно часть излучения была поглощена стенами, то выходит, что вся ионизация от космической радиации вызывается исключительно „ультрабета-лучами“. Для объяснения аномального поглощения в переходном слое из двух веществ Скобельцын принимает, что поглощение вторичных электронов ультрабета-лучей зависит от атомного номера элемента. Большое поглощение в среде с высоким атомным номером обуславливает меньшую интенсивность ионизации внутри этой среды. Рис. 4, взятый из статьи Скобельцына, иллюстрирует это обстоятельство.

Если верхняя кривая соответствует поглощению в воздухе, а нижняя в свинце, то переход на какой-либо глубине от воздуха к свинцу будет представлен пунктирной линией, показывающей, что при тонких слоях свинца коэффициент поглощения должен иметь несколько большее значение, чем в самом свинце. Следует заметить, что все это объяснение носит чисто формальный характер и несколько не связано с физической сущностью явления.

Если верхняя кривая соответствует поглощению в воздухе, а нижняя в свинце, то переход на какой-либо глубине от воздуха к свинцу будет представлен пунктирной линией, показывающей, что при тонких слоях свинца коэффициент поглощения должен иметь несколько большее значение, чем в самом свинце. Следует заметить, что все это объяснение носит чисто формальный характер и несколько не связано с физической сущностью явления.

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО СЧЕТЧИКА Г. ГЕЙГЕРА И В. МЮЛЛЕРА К НАБЛЮДЕНИЮ ОТДЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В упоминавшейся уже нами статье об усовершенствовании методов наблюдения альфа и бета-частиц были вкратце описаны конструктивные особенности и свойства нового счетчика Гейгера и Мюллера, состоящего из небольшой цилиндрической ионизационной камеры, по оси которой в качестве электрода натянута, покрытая окислами, железная проволока. Здесь мы подробнее остановимся на том счетчике, которым воспользовались Гейгер и Мюллер¹ для наблюдений отдельных импульсов космических лучей. Длина трубки была 17 см, внутренний диаметр 3 см, толщина стенок трубки 1 мм. Чувствительность счетчика, которая определялась числом разрядов в 1 минуту от 1 мк радия, помещенного на расстоянии в 1 м, составляла 5500. Остаточный ток в лаборатории состоял из 150 отдельных разрядов. При окружении счетчика железным панцырем в 20 см толщиной, число этих разрядов уменьшалось до 40 в минуту. Железный панцырь был в начале открыт в верхней своей части для свободного доступа космических лучей. Постепенно верхняя часть закрывалась железными листами площадью 60×90 см². Внутренний электрод был обычным образом соединен с малочувствительным электро-

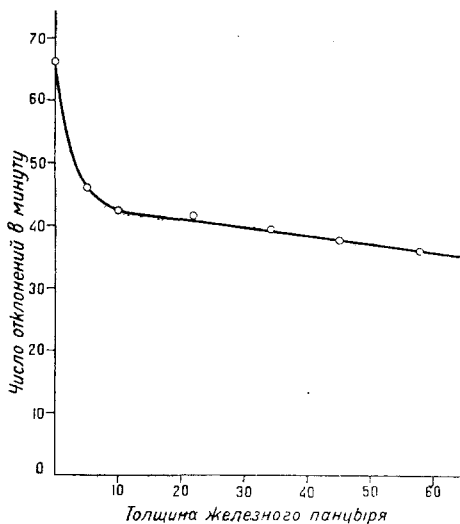


Рис. 5

¹ H. Geiger. Phys. ZS. 22, 839, 1928.

метром. На рис. 5 изображен ход кривой поглощения космических лучей в железе, полученный Гейгером и Мюллером при помощи этой простой установки.

Резкое спадание кривой поглощения зависит от радиоактивных примесей, находящихся в стенах лаборатории и дающих гамма-лучи. Точность такого рода измерений определяется числом разрядов, приходящихся на одну точку. На приведенной кривой на каждую точку приходится около 2000 разрядов. Получение данных для всей кривой потребовало времени от 6 до 7 часов. Это время можно сократить в несколько раз, взяв счетчик еще большего размера и применив для регистрации отбросов фотографический метод. С целью проверить постоянство показаний счетчика Гейгера и Мюллера производили наблюдения с ним в течение 14 дней, и при этом оказалось, что в пределах неизбежных статистических колебаний счетчик все это время работал совершенно одинаково. Мы не будем останавливаться на дальнейших работах Гейгера и Мюллера, так как они касаются главным образом изучения различных свойств счетчика в зависимости от тех или иных изменений в его конструкции и в размерах его отдельных частей. Отметим здесь лишь еще одно достоинство цилиндрического счетчика — небольшие колебания в давлении воздуха, находящегося внутри счетчика, не отражаются на качестве и постоянстве его работы. Так как давление внутри счетчика тесно связано с потенциалом, приложенным к его обкладке, то то же самое можно сказать и об этом потенциале. Только что описанный счетчик Гейгера и Мюллера был наполнен сухим воздухом при 50 мм ртутного столба и к нему был приложен потенциал в 1200 V; он давал одни и те же показания при колебаниях потенциала в пределах 50 V. Единственно, что затрудняет непосредственное применение нового счетчика для изучения космических лучей, это невозможность отделить импульсы, обязанные своим происхождением космической радиации, от всех остальных, которые неизбежно присутствуют в нем и в сумме составляют значительную часть всех наблюдаемых разрядов. У Скобелына, как мы видели, выделение путей быстрых электро-

нов происходило благодаря присутствию магнитного поля. В случае счетчиков Гейгера и Мюллера задача о выделении импульсов космических лучей была чрезвычайно остроумно, хотя и несколько сложно разрешена в работе В. Боте и В. Кольгерстера. К подробному описанию этой во всех отношениях замечательной и интересной работы мы теперь и перейдем.

РАБОТА В. БОТЕ И В. КОЛЬГЕРСТЕРА

Основная мысль, положенная Боте и Кольгерстером ¹ в их работу, заключалась в применении двух цилин-

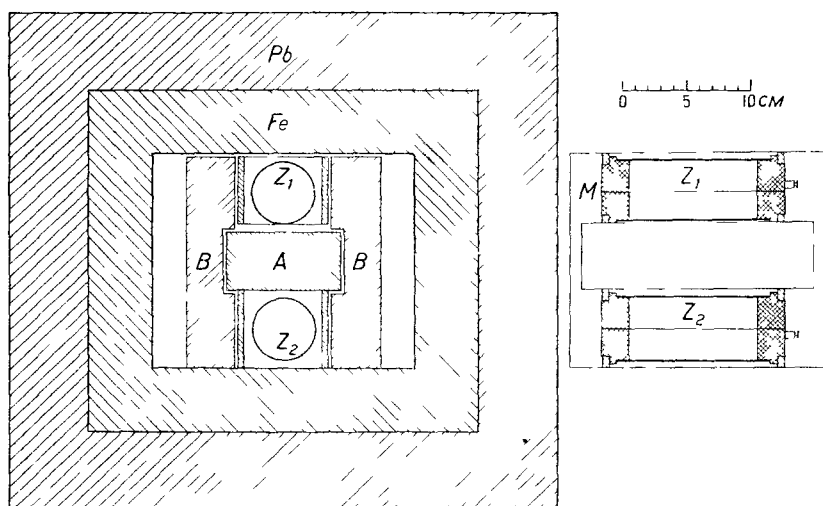


Рис 6

дрических счетчиков, для выделения отдельных лучей, проходящих оба счетчика одновременно. Главная часть их установки схематически изображена на рис. 6.

Внутренний диаметр счетчиков Z_1 и Z_2 был 5 см, длина их 10 см, толщина стенок (цинк) 1 мм. По оси трубок между эбонитовыми пробками была натянута окисленная прово-

¹ W. Bothe und W. Kolhorster Z Physik 56, 751, 1929.

лока. Давление газа внутри счетчиков было от 4 до 6 см ртутного столба. Оба счетчика помещались в подставке *M*, которая позволяла вкладывать между ними поглощающие слои до 45 мм толщиной. По бокам счетчиков находились 2 свинцовых экрана *ВВ*. Эти экраны были рассчитаны таким образом, что любая частица, которая, благодаря рассеянию (а не прямолинейно) могла бы попасть из одного счетчика в другой, прошла бы большую массу вещества, чем при прямолинейном пути через поглощающий слой *A*. Вся эта установка находилась в панцире из 5 см железа плюс 6 см свинца. Интересно отметить, что свинец был взят 150-летнего возраста, и специальные опыты показали, что он свободен от гамма-лучей. На обкладку цилиндрических конденсаторов был дан потенциал в 1300 V, который оставался без изменения в течение всей работы (около 3 месяцев).

Для регистрации совпадений (одновременных прохождений луча через оба счетчика), отклонения электрометров, соединенных со счетчиками, фотографировались на фильме, двигавшемся со скоростью 1 см в секунду. Два противоположных отклонения считались совпадающими, если они находились на расстоянии не большем, чем 0,01 см, что соответствовало по времени $\frac{1}{100}$ сек. От полученного таким путем общего числа совпадений необходимо было вычесть число случайных совпадений. Если на протяжении отрезка фильма длиной *l* первый счетчик дал N_1 отклонений, а второй N_2 , то вероятность случайных совпадений будет пропорциональна произведению N_1 на N_2 и промежутку фильма, на котором мы считаем отклонения совпадающими, то есть 2·0,01 см (в обе стороны, что и дает множитель 2). Кроме того при данных N_1 и N_2 число случайных совпадений будет обратно пропорционально всей рассматриваемой длине *l*. Отсюда имеем формулу для вычисления $N = \frac{2 \cdot 0,01}{l} N_1 N_2$. В качестве примера Боте и Кольгерстер приводят таблицу (см. табл. I на стр. 15).

Для пояснения ее рассмотрим случай, приведенный в первой строчке. Здесь $\frac{2 \cdot 0,01}{l} N_1 N_2 = \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 310 \cdot 176}{391} = 2,8$. Вычитая 2,8 из общего числа совпадений, равного 10, получим

число 7,2, приведенное в таблице, как число систематических совпадений, вызванных космическими лучами. Уже при рассмотрении этой таблицы видно, что число совпадений настолько велико, что невольно наводит на мысль о наличии корпускулярных лучей. Опыты с поглотителем, повидимому, еще более подкрепляют это предположение.

Т а б л и ц а I
Первый этаж. Фильм 14

Время регистрации в мин.	Поглотитель золота в см.	Длина фильма в см.	Отбросы наверху	Отбросы внизу	Совпадения (сосчитано)	Случ. совпадения (вычислено)	Систем. совпадения (вычислено)
7	0	391	310	176	10	2,8	7,2
15	4,1	894	623	323	36	4,5	31,5
15	0	823	619	364	33	5,5	27,5
15	4,1	878	625	324	27	4,6	22,4
8	0	496	339	187	13	2,6	10,4
Сумма: 30	0	—	1268	727	—	—	45,1
" 30	4,1	—	1248	647	—	—	53,9

Первоначальные опыты были произведены Боте и Кольгерстером в первом этаже главного здания Physikalisch-Technische Reichsanstalt в Берлине. Применение даже 4 см свинца в качестве поглотителя почти не уменьшало числа совпадений, а между тем более толстый поглотитель в установку не помещался. Так как вся аппаратура была уже построена, то им пришлось ограничиться толщиной в 4 см, только вместо свинца было взято золото. Результаты этих измерений сведены во второй таблице. В виду своеобразного характера наблюдений мы приводим здесь и эту таблицу (см. табл. II на след. стр.).

Вычисляя из данных этой таблицы $\frac{\mu}{\rho}$ Боте и Кольгерстер получают:

$$\frac{\mu}{\rho} = (3,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{г.}$$

Таблица II
Первый этаж

Фильм №	Без поглотителя				С 4,1 см золота			
	Время регр. в мин.	Отбросы наверху	Отбросы внизу	Системаги- ческие совпадения	Время регр. в мин.	Отбросы наверху	Отбросы внизу	Системаги- ческие совпадения
9	16	633	428	23,3	16	642	429	33,8
10	20	726	468	29,4	20	742	460	34,3
11	26	959	642	50,0	30	1130	721	59,8
12	32	1252	766	60,0	30	1109	666	57,3
13	30	1168	668	38,1	30	1156	640	35,6
14	30	1268	727	45,1	30	1248	647	53,9
15	27	1249	625	52,1	30	1315	662	43,5
16	30	1256	661	54,8	30	1263	615	38,1
В Σ	211	8511	4985	352,8	216	8605	4840	356,3
В 216 мин.	—	8713	5003	361,2	—	8605	4840	356,3
В мин. . . .	—	40,3	23,6	1,67	—	39,8	22,4	1,65

Уменьшение числа совпадений в 216 мин. (\pm средн. ошибка) : $5,4 \pm 26,8 = (1,5 + 7,4) \%$.

Такая величина коэффициента поглощения еще более утвердили Боте и Кольгерстера в корпускулярной природе космических лучей. Действительно этот коэффициент столь близко подходит к коэффициенту первичных лучей, что мысль об участии в совпадениях вторичных лучей отпадает сама собой. Как мы видим, однако, из второй таблицы средняя вычисленная ошибка $\pm 26,8$ превосходит по абсолютному значению измеренную разность 5,4. Чтобы усилить эффект поглотителя Боте и Кольгерстер поставили наблюдения на чердаке того же здания, при чем оба панцыря были сняты со счетчиков. Так как поглощение в здании и в панцырях было довольно велико (оно соответствовало 3 м воды), то количество разрядов, благодаря увеличению интенсивности, возросло в обоих счетчиках. Кроме того в составе космических лучей в новых условиях опыта большое значение приобрела мягкая составляющая

космической радиации. Все эти обстоятельства позволяли лучше заметить влияние поглощающего экрана, помещаемого между счетчиками. Мы не будем приводить целиком третьей таблицы Боте и Кольгерстера, так как она вполне аналогична таблице II, а поместим из нее лишь последнюю строчку.

Таблица III

Чердак

Фильм №	Без поглотителя				С 4,1 см золота			
	Время регистрац. в мин.	Отбросы наверху	Отбросы внизу	Системати- ческие отбросы	Время регистрац. в мин.	Отбросы наверху	Отбросы внизу	Системати- ческие отбросы
—	—	—	—	—	—	—	—	—
Σ	358	19 786	12 141	980,5	360	19 814	10 562	743,2
В 360 мин.	—	10 897	12 209	986,0	—	19 814	10 562	743,2
В мин. . .	—	55,3	33,9	2,74	—	55,0	29,3	2,06

Уменьшение числа совпадений в 360 мин $242,8 \pm 41,6 = (24,6 \pm 4,2) \%$

Из последней таблицы видно, что в новых условиях ошибки наблюдения $\pm 41,6$ уже меньше наблюдаемой разности 242,8. Вычисление коэффициента поглощения в этом случае дало величину

$$\frac{\mu}{\rho} = (3,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{г}$$

еще более близко и более точно подходящую к известному коэффициенту поглощения космических лучей. Такое совпадение, конечно, еще сильнее укрепило уверенность Боте и Кольгерстера в корпускулярной природе космической радиации.

Из описанной работы видно, какие экспериментальные трудности приходилось преодолевать Боте и Кольгерстеру, чтобы добиться возможности сосчитать число совпадающих показаний двух цилиндрических счетчиков. Эти трудности учитываются и самими авторами работы. Вот

почему они не ограничиваются полученными результатами, а ставят еще ряд контрольных опытов, позволяющих с большим доверием отнестись к полученным результатам. Остановимся только на некоторых из этих опытов.

В шахте на глубине 406 м два цилиндрических счетчика были помещены непосредственно один над другим. Оказалось, что в течение целого часа не произошло ни одного совпадения в показаниях этих двух счетчиков, так как космические лучи не могли уже проникнуть сквозь толщу в 400 м, а остаточные разряды были настолько редки, что не давали даже случайных совпадений.

Т а б л и ц а IV

Чердак. Счетчики друг над другом
без поглотителя

Расстояние между осями трубок в м.и	Дробь совпадений (% отбросов вниз)	
	Первый этаж	Чердак
54	—	22,5
74	—	14,6
104	9,3	9,7

Было показано, что при увеличении расстояния между двумя счетчиками число совпадений уменьшалось в соответствии с уменьшением телесного угла. Численные данные этого опыта приведены в таблице IV.

Если оба счетчика положить один около другого, то число совпадений оказывается вдвое меньше того случая, когда они находятся непосредственно один над другим. Все это показывает, что интенсивность излучения, вызывающего совпадающие разряды в обоих счетчиках, распределена в пространстве так же, как и у космических лучей.

Интересен также опыт, проделанный Боте и Кольгерстером по изучению совпадений, вызванных гамма-лучами радия С. Общее расположение счетчиков показано на рис. 7.

Оба счетчика были взяты значительно меньших размеров (диаметр 2 см, длина 4 см) для того, чтобы по возможности

уменьшить влияние космических лучей. Кроме того они были положены рядом в горизонтальном направлении, а не один над другим, что, как мы видели, также уменьшает число совпадений, вызываемых космическими лучами. Чтобы облегчить переход сравнительно медленных электронов одного счетчика в другой, половинки их, обращенные друг к другу были сделаны из алюминиевой

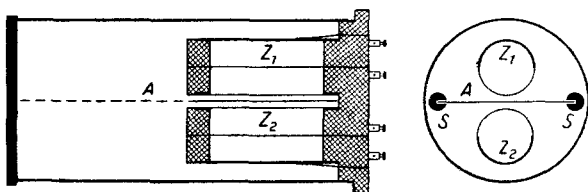


Рис. 7

фольги, толщиной всего в 0,03 мм. Оба счетчика Z_1 и Z_2 помещались в стеклянной трубке, которая откачивалась до давления в 4 см ртутного столба. Кроме того в той же стеклянной трубке помещались две шины, по которым могли скользить тонкие экраны. Достаточно было наклонить сте-

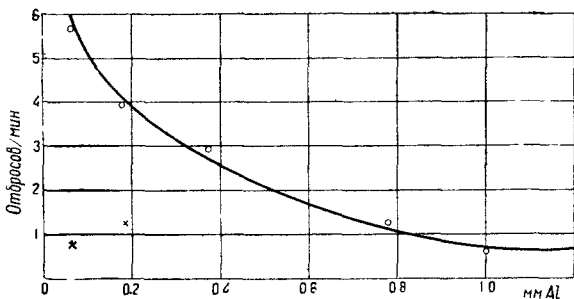


Рис. 8

клянную трубку, чтобы экран подвинулся и поместился между счетчиками. Обратный наклон стеклянной трубки уводил этот экран в часть трубки, незанятую счетчиками. Вся эта установка помещалась в описанный уже раньше двойной панцырь, в котором было проделано отверстие для пучка гамма-лучей, падающего на счетчики горизонтально и пер-

пендикулярно их осям. Результаты опыта изображены в виде кривой на рис. 8.

Коэффициент поглощения, вычисленный из этой кривой, совпадает со средним коэффициентом поглощения, полученным другими методами для вторичных электронов, вызванных гамма-лучами радия С.

Этот опыт интересен еще с одной точки зрения: он показывает, что гамма-лучи не могут вызывать совпадения разрядов в счетчиках. Только вторичные электроны дают

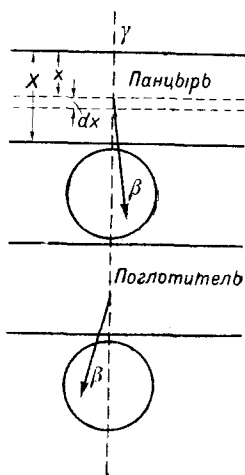


Рис. 9

такие разряды. Следовательно в счетчиках с толстыми стенками на совпадение разрядов не может влиять не только радиоактивность окружающих предметов, но даже и радиоактивность самих стенок. Оба эти фактора могут увеличить лишь число случайных совпадений, а не систематических.

Кроме специальных опытов Боте и Кольгерстер подкрепляют свои выводы еще целым рядом рассуждений и расчетов. Мы приведем вкратце только наиболее интересные. Прежде всего эти исследователи разбирают вопрос о возможности появления одновременных разрядов в обоих счетчиках

от ультра-гамма-луча. Рис. 9 иллюстрирует это предположение.

Гамма-луч, проходя через панцирь, освобождает в нем комптоновский электрон. Так как в случае ультра-гамма-луча путь электрона почти совпадает с направлением луча, то электрон попадает в первый счетчик, но не достигает второго. Тот же луч освобождает в поглотителе второй электрон, попадающий уже во второй счетчик. Очевидно, что при таком процессе разряды в счетчиках совпадут. Однако, если считать, что механизм ионизации ультра-гамма лучами похож на механизм ионизации обычными гамма-лучами, то такое появление двух электронов от одного и того же ультра-гамма-луча мало вероятно. Боте и Кольгерстер

упоминают еще об одной возможности объяснения наблюдаемых ими совпадений. Можно предположить, что механизм ионизации ультра-гамма лучей, благодаря большой энергии их кванта, становится похожим на механизм ионизации бета-лучами. Но такое объяснение, как взятое ad hoc, они отвергают.

Только после контрольных опытов и обсуждения различных возможностей Боте и Кольгерстер решаются окончательно утверждать, что наблюдаемые ими совпадения обязаны корпускулярным лучам, и переходят к описанию свойств этих лучей. Нанося точки поглощения, отнесенные к количеству электронов в единице объема свинца, они показывают, что ход этих точек согласуется с ходом кривой, полученной для свинца Штейнке.

Кружки на рисунке соответствуют совпадающим показаниям обоих счетчиков, кресты — показаниям нижнего счетчика после поправки на собственное излучение и излучение лаборатории. В

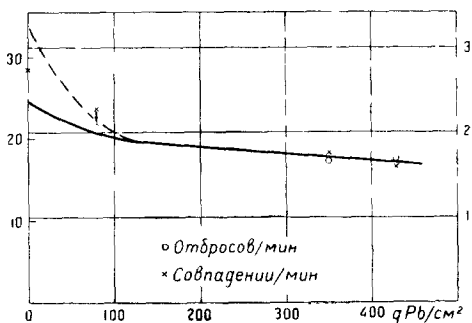


Рис. 10

переходном слое даны две кривых. Пунктирная линия соответствует поглощению в переходном слое из воздуха в свинец, жирная — поглощению в одном свинце. Как видно из рисунка, точки Боте и Кольгерстера очень хорошо ложатся на кривую в нижней части. Несколько хуже дело обстоит в начале кривой, но все же можно заметить, что поглотитель на чердаке вызывает резкое anomальное спадение. При опытах в первом этаже этого явления не замечается, так как дальнейший ход кривой относится к лучам, прошедшим уже через стены лаборатории и панцырь. Этот результат лишний раз подчеркивает идентичность наблюдаемых Боте и Кольгерстером лучей с космическими.

• После вывода заключения о корпускулярной природе

первичных космических лучей естественно было перейти к определенным представлениям о природе этих лучей. Как мы видели уже и раньше, многими исследователями предлагалась для объяснения космической радиации гипотеза космических электронов большой скорости. Эта гипотеза достаточно хорошо согласуется с данными опытов Боте и Кольгерстера. В самом деле этим данным не противоречат отрицательные результаты, полученные исследователями, пытавшимися определить концентрацию отрицательного заряда от космических электронов на изолированном теле. По подсчету Боте и Кольгерстера через 1 см^2 в $1\frac{1}{2}$ мин. проходит не более одного космического электрона. Если принять во внимание еще и ничтожное поглощение космических лучей, то вполне понятно, что нечего и надеяться обнаружить космические электроны таким способом, как простое накопление заряда на изоляторе. Не должны оказывать космические электроны никакого влияния и на сохранение отрицательного заряда земли, так как положительный вертикальный ток в атмосфере превосходит ток от космических электронов в 10^5 раз.

Зная число электронов, проходящих через счетчики, объем счетчиков и среднюю длину пути в счетчике, нетрудно получить приблизительную величину ионизации, приходящуюся на 1 см пути космического электрона. Эта величина оказывается равной 90 ионам. Это число довольно хорошо согласуется со значением в 40 ионов, полученным путем экстраполяции для быстрых бета-частиц. Мы не останавливаемся подробнее на вычислении всех этих величин, так как все они получены путем экстраполяции и для окончательного суждения о природе корпускулярных лучей служить не могут.

К тому же заключению приходят и сами авторы. Они со своей стороны считают необходимым рассмотреть еще одну возможную гипотезу — гипотезу быстро движущихся протонов. При таких больших скоростях и энергиях уменьшается разница во внешних проявлениях не только между электронами и квантами, но и между протонами и электронами. Боте и Кольгерстер указывают, что для энергии

в 10^9 V для протона отношение его скорости к скорости света равно $\beta = 0,875$, для электрона $\beta = 1 - 1,3 \cdot 10^{-7}$. Масса протона удваивается, а масса электрона достигает величины покоящейся массы протона. $H\rho$ — произведение напряжения магнитного поля на радиус кривизны для протона $5,5 \cdot 10^6$, а для электрона $3,3 \cdot 10^6$ — величины почти одинаковые. Ионизирующая способность протона с большой скоростью также не сильно отличается от ионизирующей способности электрона соответствующей скорости. Таким образом с одинаковым правом можно было бы представить себе космические лучи, как поток космических протонов. Эта последняя гипотеза еще более заманчива, чем гипотеза космических электронов, но менее привычна, и вероятно потому Боте и Кольгерстер скорее склоняются в сторону первой. Окончательное решение вопроса могут дать лишь дальнейшие опыты по изучению зависимости интенсивности космических лучей от азимута. Такие опыты, как мы видели, уже производились и не дали никаких указаний на существование отклонения в магнитном поле земли. Возможно, однако, что в местах наибольшей интенсивности этого поля и удастся получить иные результаты. Боте и Кольгерстер пишут, что наблюдения в этом направлении уже намечаются.

СРАВНЕНИЕ РАБОТЫ Д. СКОБЕЛЬЦЫНА С РАБОТОЙ В. БОТЕ И В. КОЛЬГЕРСТЕРА

Нам остается теперь сравнить между собой результаты описанных здесь работ и попытаться вывести из них общие заключения. Мы видели, что как работа Скобелъцына, так и работа Боте и Кольгерстера достигают пределов точности современной экспериментальной техники. Однако экспериментальные трудности каждой из этих работ совершенно своеобразны. Остановимся сначала на недостатках, которые связаны с наблюдением отдельных частиц в камере Вильсона. Самым существенным из этих недостатков нужно считать малость того промежутка времени, в течение которого можно наблюдать прохождение космических

лучей через камеру Вильсона. По приблизительным, но как указывает сам Скобельцын, не очень убедительным подсчетам промежутков времени, в течение которого пути частиц могут стать видимыми, колеблется от 0,02 до 0,03 сек. Воспользоваться частым расширением камеры мешает нагревание соленоида, создающего магнитное поле. В результате число отдельных лучей, которые удалось наблюдать в камере Вильсона, равно всего 32. Самая установка настолько сложна, что о переносе ее или применении какого-либо поглотителя говорить совершенно не приходится. Кроме того автору настоящей статьи приходилось много раз наблюдать, что при разрежениях, следовавших быстро одно за другим, след одной и той же бета-частицы появлялся и исчезал до четырех раз. Принимая во внимание, что магнитное поле включается лишь на короткий промежуток времени и непосредственно перед опусканием поршня в камеру, приходится считаться с возможностью образования основ пути еще до включения магнитного поля. После включения магнитного поля и опускания поршня капельки на ионах увеличиваются, путь становится видимым, но, конечно, уже остается прямолинейным. Это последнее обстоятельство, так же как остальные, необходимо учитывать и с осторожностью подходить к результатам подсчетов. Но если камера Вильсона, как измерительный прибор, обладает многими недостатками, то у нее есть и громадное преимущество — а именно возможность непосредственно наблюдать характер ионизации. Во многих случаях, как известно, удается даже сосчитать число ионов, приходящихся на 1 см пути.

На то обстоятельство, что результаты, полученные с камерой Вильсона, относительно природы космических лучей еще далеко нельзя считать окончательно установленными, указывает, хотя бы появление заметки Оже и Скобельцына в *Comptes rendus*.¹ В этой заметке авторы дают уже другое толкование наблюдавшимся в камере параллельным путям. Первое толкование — расщепление атома

¹ С. R. 189, p. 55, 1929.

квантом космического луча уже оставлено, так как такое расщепление если и имеет место, то должно встречаться гораздо реже. Вместо этого выдвигается другая гипотеза об освобождении квантом первичного космического луча последовательно двух комптоновских электронов. Однако эта вторая гипотеза, как мы уже видели, была разобрана Боте и Кольгерстером и оказывается, пожалуй, еще менее вероятной, чем первая. Между тем Оже и Скобельцын видят в ней главное доказательство квантовой природы первичных лучей. Из этой полемики нетрудно заключить, что мы еще действительно далеки от окончательного решения вопроса о природе первичных космических лучей.

В установке Боте и Кольгерстера отсутствуют почти все те недостатки, которые были нами указаны в установке Скобельцына. Счетчики могут работать часами и даже сутками без перерыва. Число отсчетов чрезвычайно велико. В описанной нами работе Боте и Кольгерстера их было около 90 тысяч. Сравнительно легко можно применять различные поглощающие экраны. Режим работы счетчиков—отбросы нитей электрометров—почти совершенно не меняется с течением времени. Но зато любому лучу, почти что независимо от его происхождения и интенсивности, соответствует один и тот же отброс электрометра. В распоряжении автора настоящей статьи имеется в настоящее время несколько различных счетчиков Гейгера и Мюллера, и нужно сказать, что иногда бывает даже досадно видеть, насколько одинаково отвечают такие счетчики и на космические лучи, и на гамма-лучи радия С, и на радиоактивность стен, и, наконец, на лучеиспускание собственной внутренней поверхности. Если в установке Скобельцына выделение быстрых электронов путем кратковременного включения магнитного поля вызывает сомнение возможностью образования пути до включения магнитного поля, то в установке Боте и Кольгерстера при выделении космической радиации таким же мешающим обстоятельством служит присутствие случайных совпадений. В табл. I мы уже видели, что при сколько-нибудь значительном поглощении ошибка начинает превосходить измеряемую величину.

Все описанные нами здесь затруднения ведут к тому, что пока еще нельзя дать точного ответа на вопрос о природе космического излучения. Почти непрерывно появляются статьи, в которых все с бóльшей и бóльшей убедительностью доказывается, что если кванты, электроны и протоны обладают энергией космического луча, то свойства их при прохождении через материю становятся почти одинаковыми. Совсем не исключена, напр., возможность, что квант космического луча, обладая большой массой, ионизует равномерно на своем пути, подобно тому как это мы наблюдали раньше только у бета-частиц. Возможно также, что космическая радиация состоит отчасти из квантов, отчасти из электронов и протонов. Различия между этими родами космических лучей должны быть настолько тонкими, что их еще нельзя установить при помощи предложенных методов. Но одно можно отметить с полной достоверностью — это то, что мы получили возможность отличать и наблюдать отдельные импульсы космических лучей. По сравнению с методом наблюдения и измерения суммарной ионизации это несомненно громадный шаг вперед в деле изучения природы космических лучей. И вряд ли мы ошибемся, если выразим уверенность, что путем одновременного применения описанных нами двух различных методов, путем взаимной проверки результатов, полученных одним и другим методом, удастся в ближайшее время разрешить вопросы о природе и составе космической радиации. Перед экспериментальной физикой как будто вновь открывается широкое и интересное поле исследования, которое может быть действительно приведет к пониманию процесса образования атомов химических элементов.