

НОВЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ *

А. Г. Комптон, Чикаго США

Для того чтобы правильно осветить результаты новейших исследований о космических лучах, позволим себе очень кратко напомнить их прежнюю историю. Хорошо известно, как в начале текущего столетия Вильсон¹, а также Эльстер и Гейтель² установили, что обычный воздух слабо ионизован и как затем Макклеллан и Буртон³ в Торонто и Резерфорд и Кук⁴ в Монреале, пользуясь поглощающими экранами, показали, что заметная часть этой ионизации вызывается проникающей радиацией, приходящей извне ионизационной камеры. Предполагалось, что эта радиация является γ -лучами, идущими от радиоактивных веществ, которые, как известно, встречаются в почве и в воздухе. Однако наблюдения Вульфа⁵, произведенные около 1910 г. на высоких башнях, а также серия подъемов на воздушном шаре Гокеля⁶ показали, что интенсивность этих ионизирующих лучей уменьшается с высотой медленнее, чем это можно было бы объяснить. Эти удивительные результаты привели к дальнейшим наблюдениям на воздушном шаре, проведенным Виктором Гессом^{7,8} и В. Кольгерстером⁹. Эти исследователи установили, что интенсивность проникающей радиации действительно увеличивается с возрастанием высоты, чего, конечно, не наблюдалось бы, если бы источником радиации служила почва. Из этих исследований Гесс⁸ в 1912 г. вывел смелое заключение о том, что проникающая радиация попадает в нашу атмосферу извне, из источника, однородного по всем направлениям. Все новые исследования подтверждают такую интерпретацию проникающего излучения.

В годы войны, а также несколько лет после нее, обращалось мало внимания на эти незадолго до того открытые лучи.

Некоторые, включая Гофмана¹⁰ и Милликена,¹¹ сомневались в их существовании. Другие, в особенности Кольгерстер¹², занялись измерением их поглощения и исследованием изменения их интенсивности с течением времени. В 1925 г. Милликен, убедившись в действительном существовании этих лучей с помощью своих значительно улучшенных измерений поглощения их в воде¹³, выдвинул гипотезу

* Доклад, читанный на объединенной сессии Американского физического общества и секции В Американской ассоциации для содействия успехам науки в С. Луи 1 января 1936 г. Напечатан в *Review of Scientific Instruments*, vol. 7, 1936, перевод Л. В. Грошева.

тезу¹⁴ о происхождении этих лучей. Его идея заключалась в том, что главная часть лучей состоит из фотонов, возникающих при воссоединении в межзвездном пространстве протонов и электронов в ядра гелия. Однако от этой гипотезы пришлось отказаться, так как выяснилось с несомненностью, что большая часть лучей представляет собою электрически заряженные частицы, обладающие энергиями, по величине значительно большими, чем это предполагалось Милликеном. Несмотря на это, соблазнительное предположение Милликена о связи возникновения космических лучей с происхождением вселенной оказалось очень эффективным по стимулированию громадного количества исследований и оставило широко распространенную надежду на то, что если мы узнаем, как возникают космические лучи, мы сможем прочитать в этом древнюю историю нашей вселенной.

За последние 10 лет интенсивное изучение, проведенное многими исследователями, прояснило наши знания о свойствах этих необычных лучей. Измерения поглощения обнаружили две главные компоненты с коэффициентами поглощения около 0,6 и 0,08 на 1 м воды. Вторая компонента обладает приблизительно в 100 раз большей проникающей способностью по сравнению с наиболее жесткими γ -лучами. Мы нашли, что космические лучи идут к нам далеко из-за пределов земной атмосферы и на больших высотах они обладают у магнитных полюсов во много раз большей интенсивностью, чем около экватора. Это вселяет уверенность в то, что они состоят, главным образом, из электрически заряженных частиц. Полное количество тепла, приносимое ими на землю, того же самого порядка, что и тепло, приносимое светом от звезд. Отдельные частицы космических лучей обладают, однако, необычно большими энергиями от 10^9 и, возможно, почти до 10^{12} eV. Это означает 1 эрг энергии на отдельный атомный снаряд.

ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Современное исследование космических лучей касается, главным образом, двух вопросов: о свойствах этих лучей и применении их в других исследованиях, как средства воздействия. Среди важных свойств лучей наиболее непосредственный интерес представляет их состав, т. е. природа частиц, из которых они состоят, и энергии, которыми эти частицы обладают. Какие эффекты должны производить лучи, когда они проходят через вещество? Где они берут начало и как они возникают? Среди применений космических лучей отметим применение их к ядерной физике, где в руках Андерсона они привели к открытию позитронов. Из исследования их географического распределения мы расширяем наши знания о земном магнитном поле высоко над атмосферой. Электродинамика подверглась испытанию в области энергий, до сих пор недоступных. В астрономии космические лучи как будто бы могут дать нам мощное средство для того чтобы изучить вращение галактики и раннюю историю нашей вселенной. В биологии не исключено, что они

играют важную роль в самопроизвольных вариациях, от которых зависят эволюционные изменения.

СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

По аналогии с γ -лучами исключительно большая проникающая способность космических лучей вначале считалась признаком того, что они представляют собой фотоны. Однако в 1929 г. замечательные опыты Боте и Кольгерстера¹⁵, произведенные со счетчиками, работавшими на совпадении, дали сильное доказательство того, что первичные космические лучи состоят из электрически заряженных частиц. Эти исследователи обратили внимание на тот факт, что такие частицы, приближаясь к земле, должны были бы отклоняться магнитным полем земли таким образом, что они бы много легче достигали полюсов, чем экватора. Это предположение привело к серии подробных исследований, которые дали нам как будто бы непосредственное доказательство того, что первичные космические лучи состоят из электрически заряженных частиц. Я хочу кратко рассмотреть эти доказательства и затем указать, каким образом дальнейшие эксперименты позволили провести пробный анализ этих электрических лучей на компоненты, которые были отождествлены с обычными атомарными частицами.

Клей¹⁶ к тому времени только что опубликовал свои первые измерения, показавшие, что интенсивность космических лучей в Голландии больше, чем на Яве. Это различие в интенсивностях Боте и Кольгерстер приписали ожидаемому действию земного магнитного поля. Вначале экспедиции Боте и Кольгерстера¹⁷, Милликена и Камерона¹⁸, Керр Гранта¹⁹ и других не подтвердили повторно найденное Клеем явление²⁰; поэтому вообще принималось,²¹ что никакого широтного эффекта не существует. Однако затем были произведены обширные серии наблюдений, которые подтвердили результаты Клея и показали, что изменение интенсивности с географической широтой связано с магнитным полем земли так, как это предсказывали Боте и Кольгерстер.

С 1931 г. по 1934 мы послали из Чикаго 12 различных экспедиций, включивших в себя около 80 физиков; были проведены измерения больше, чем на 1000 мест, широко распределенных по земной поверхности²². Полученные результаты показали, что для магнитных широт, больших 50° , не наблюдается на уровне моря никакой зависимости от широты. Однако от экватора до широты в 50° имеется на уровне моря возрастание интенсивности приблизительно на 16% . Подобные современные измерения, сделанные многими различными авторами, привели существенно к тем же самым результатам²³. На рис. 1 приведена сводка опубликованных наблюдений, проведенных различными экспедициями, изучавшими географическое распределение космических лучей на уровне моря. Данные приведены в форме кривых (их можно назвать изокосмами) одинаковой интенсивности космических лучей; при этом все результаты различных исследователей перечислены к одной и той же шкале.

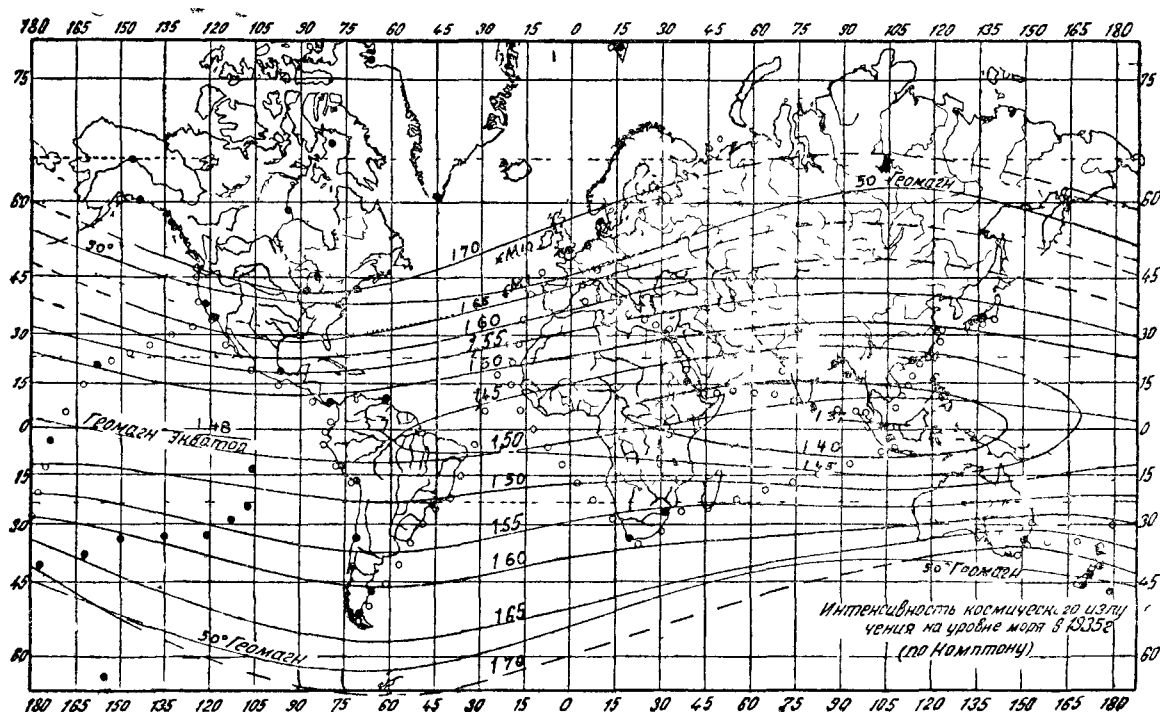


Рис. 1. Кривые одинаковой интенсивности космических лучей (изокосмы), показывающие приблизительный параллелизм с параллелями геомагнитной широты и с кривыми одинаковой встречаемости полярных сияний.

Сплошные точки представляют место расположения (на уровне моря) наблюдателей наших чикагских экспедиций; кружки построены по сообщениям других наблюдателей, среди которых могут быть в особенности упомянуты Клей, Хорлин, Милликен и Нигер, Принс и их сотрудники. В то время как Милликен и Нигер нашли средний широтный эффект равным 10^0 , в отличие от нулевого эффекта, о котором они сообщали три года назад,²⁴ все другие наблюда-

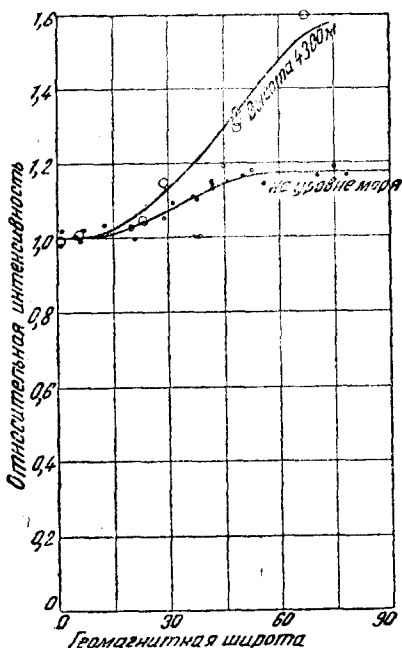


Рис. 2. Увеличение широтного эффекта с высотой по наблюдениям, произведенным на горах.

тели нашли уменьшение, близкое, к 14^0 , наблюдаемое при перемещении от полюса к экватору. Имеются поэтому некоторые затруднения в количественном согласовании результатов Милликена и Нигера с данными других авторов. Однако качественное согласие между различными авторами можно считать превосходным.

Нанесенные на рис. 1 изокосмы близки по своей кривизне к параллелям геомагнитной широты, подчеркивая этим зависимость явления от земного магнитного поля. Еще ближе проявляется параллелизм между изокосмами и линиями одинакового числа полярных сияний, как показывают точечные линии, взятые с карты Фритца. Это необычайное сходство должно означать, что на полярные сияния и на космические лучи земное магнитное поле действует одинаковым образом. Из приведенной карты следует также меньшая экваториальная интенсивность космических лучей для вос-

точного полушария, чем для западного, в соответствии с более сильным полем земли на востоке. Подобный долготный эффект был найден независимо Клеем²³ и Милликоном и Нигером²³. Эти детали не оставляют никакого сомнения в том, что широтный эффект вызывается действием магнитного поля земли. Существование эффекта, таким образом, показывает, что по крайней мере, заметная часть первичных космических лучей состоит из электрически заряженных частиц.

Отличительная особенность широтного эффекта заключается в том, что он быстро возрастает с высотой. Это стало очевидным из наших высокогорных измерений, произведенных на разных широтах²² (рис. 2). Соответствующие данные были расширены на большие высоты измерениями Боуена, Милликена и Нигера²⁶ и Клея, произведенными на аэроплане, и в особенности наблюдениями Регенера²⁶,

Пикара и Козинса²⁷, Клея²⁸, а также Комптона, Стефенсона и Милликена²⁹ в стратосфере. На рис. 3 приведены некоторые из этих данных. Удивительным является следующий факт. В то время как на уровне моря широтный эффект составляет 15—20%, у верхней границы атмосферы интенсивность, наблюдаемая на геомагнитной широте в 52°, в 2 раза больше интенсивности на широте в 42°, веро-

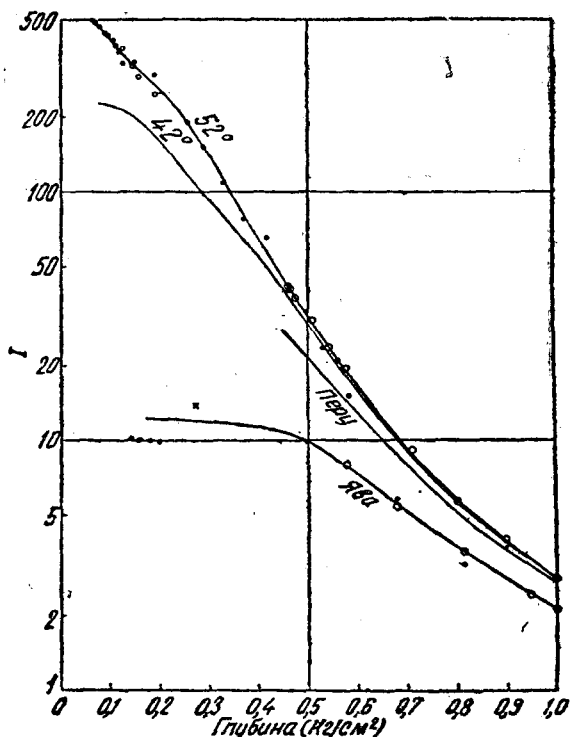


Рис. 3. Высотные измерения космических лучей в функции глубины, считаемой от верхней границы атмосферы. 52° — Комптон, Стефенсон, Милликен; 42° — Милликен — Боуэн; Перу — Милликен, Нигер; Ява — Клей.

ятно в 5—10 раз больше найденной в Перу и приблизительно в 40 раз превосходит интенсивность, обнаруженную Клеем возле экватора на Яве. Это резкое изменение с широтой наблюдалось непосредственно Козинсом³⁰, когда его сносило на юг в пикаровском воздушном шаре. У верхней границы атмосферы отношение интенсивностей на полюсе и экваторе, конечно, больше, чем все то, что указывается этими экспериментами; очень возможно, что оно порядка 100.

Так как на электрически нейтральные лучи магнитное поле земли не должно действовать, то этот результат показывает сразу

что ионизация, создаваемая такими лучами на границе атмосферы возле полюсов, составляет, вероятно, не больше, чем несколько процентов от общей ионизации.

Следует отметить, что лучи, достигающие земной поверхности на экваторе, поглощаются по существу так же, как лучи, отклоняемые земным магнитным полем и состоящие поэтому из заряженных частиц. На рис. 4 А дает кривую поглощения в атмосфере для космических лучей, наблюдаемых на больших магнитных широтах, кривая В — то же самое для экваториальных лучей³¹. Кривая С дает разность между А и В и, следовательно, показывает погло-

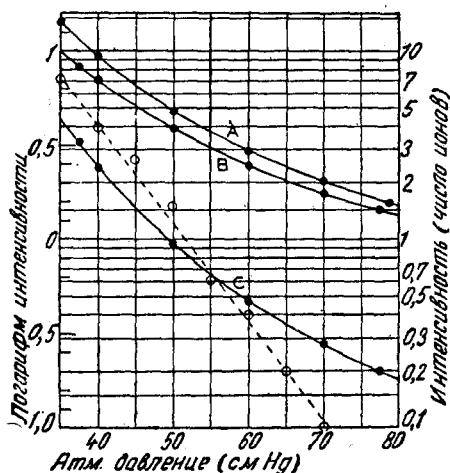


Рис. 4. Кривая С, указывающая поглощение электрически заряженных частиц, имеет ту же форму, что и кривая В, относящаяся к космическим лучам, достигающим земли на экваторе.

шение электрически заряженных частиц, на которые земное магнитное поле действует таким образом, что они не могут достигать земной поверхности на экваторе. Большое сходство кривой В, относящейся к лучам, пропускаемым магнитным полем, и кривой С только для лучей заряженных частиц наводит на мысль о том, что оба сорта лучей одного и того же рода.

Еще более определенно Джонсон и Альварец и другие установили, что возле экватора космические лучи показывают восточно-западную асимметрию³², вызываемую действием земного магнитного поля. Это означает, что, по крайней мере, заметная часть даже тех лучей, которые достигают экватора через земной магнитный барьер, состоит из электрически заряженных частиц, правда очень больших энергий.

Дальнейшие опыты с космическими лучами, являющиеся расширением опытов Боте и Кольгерстера (метод совпадений), позволили

подробнее выяснить природу космических лучей. Исследования Рос-си³³ и Сиунга³⁴ приводят, повидимому, к неизбежному заключению о том, что наиболее проникающая часть космических лучей на уровне моря состоит из очень быстрых электрически заряженных частиц. Наглядное доказательство этого факта было получено недавно независимо Оже и Эренфестом³⁵, Стритом, Вудвардом и Стевенсоном³⁶. Рис. 5 показывает схематически установку с камерой Вильсона, управляемой счетчиками. В этой установке, примененной в работе последних исследователей, между верхними счетчиками

можно было поместить 45 см свинца. Сама камера Вильсона помещалась между нижними счетчиками. На 90% фотографий, сделанных с камерой, обнаруживаются следы одиночных частиц очень большой энергии.

Примером этого может служить рис. 6. Отсюда совершенно ясно, что такие совпадения вызываются первичными ионизирующими, а следовательно, несущими электрический заряд частицами, обладающими очень большой проникающей способностью. Если бы не существовало

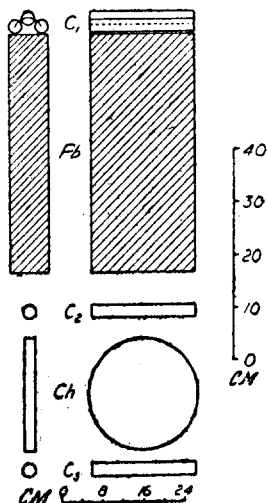


Рис. 5. Установка работающих на совпадение счетчиков C_1 , C_2 и камеры Вильсона Ch для фотографирования следов, проникающих космических лучей (Стрит, Вудвард, Стевенсон).



Рис. 6. Следы двух частиц космических лучей, прошедших через 40 см свинца.

широтного эффекта, то можно было бы допустить, что эти проникающие частицы являются вторичными, образовавшимися в верхних частях атмосферы от легко поглощаемых фотонов большой энергии. Так как, однако, теория широтного эффекта показывает, что электроны для прохождения через земной магнитный барьер должны иметь энергии порядка наблюдаемых в вышеописанных экспериментах, то отсюда становится очевидным, что наблюдаемые в этих опытах частицы принадлежат действительно к первичным космическим лучам. Наличие восточно-западной и северо-южной асимметрии³⁷ в распределении космических лучей, приблизительная независимость переходного эффекта от широты³¹

и некоторые другие ³⁸ факты являются дополнительным подтверждением того, что все наблюдаемые в настоящее время компоненты космических лучей состоят из первичных электрически заряженных частиц. Однако требуется дальнейшая работа в этом направлении. Если в первичных лучах имеются нейтральные частицы, как-то: фотоны, нейтроны, то они могут составлять не больше нескольких процентов числа частиц, вступающих в нашу атмосферу; на уровне моря они должны вызывать очень малую ионизацию, по сравнению с ионизацией, создаваемой присутствующими в большем числе электрически заряженными частицами.

АНАЛИЗ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Наша проблема сводится к тому, чтобы установить природу различных компонент электрически заряженных частиц, составляющих космические лучи, падающие на нашу землю. Для частиц малых энергий подобный анализ обычно выполняется с помощью масс-спектрографа, в котором применяются электрическое и магнитное поля. В последнее время с некоторым успехом были проведены попытки отклонить космические лучи в обычных электрических и магнитных полях. Однако энергии первичных частиц настолько велики, что они с трудом поддаются отклонению, а если это даже и происходит, то очень трудно различить между первичными космическими частицами и вторичными, создаваемыми внутри атмосферы. К счастью природа снабдила нас готовым магнитным спектрографом, подходящим для анализа первичных космических лучей. Сама земля действует как магнит, а вместо электрического поля мы имеем тормозящее действие земной атмосферы. Большим преимуществом этого естественного прибора является то обстоятельство, что он производит анализ лучей далеко над атмосферой, где они свободны от вторичных лучей. Правда, он оставляет желать многого в отношении однородности магнитного поля. Кроме того, мы еще не в состоянии точно изучить градуировочную кривую, с помощью которой можно было бы определить энергию частиц, выраженную через их проникающую способность в атмосфере. Несмотря на эти ограничения и неполноту наших знаний, попытки анализа космических лучей с помощью земного магнитного поля приводят к ценным результатам и указывают характер данных, которые должны получиться при более строгом анализе ³⁹.

Теоретические исследования Штермера ⁴⁰, Леметра и Валларта ⁴¹ и других показывают, что для заряженных частиц, приближающихся к земле из отдаленных областей пространства, для данной магнитной широты существует, грубо говоря, критическая энергия для лучей данного сорта. Это означает, что частицы этих лучей с энергиями, ниже критической, погибают и уходят прочь от земли, частицы же с большими энергиями свободно достигают земли. В соответствии с этой критической энергией должен существовать

минимальный пробег в воздухе, который частицы могут иметь на данной широте.

Наш метод магнитного анализа состоит в сравнении минимальных пробегов, вычисленных для частиц различных сортов, с экспериментальными минимальными пробегами, определенными из измерений интенсивности космических лучей на различных высотах. Найдено, что вычисленные минимальные пробеги для α -частиц, электронов и протонов соответствуют минимальным пробегам трех различных групп космических лучей. Хотя это сравнение в насто-

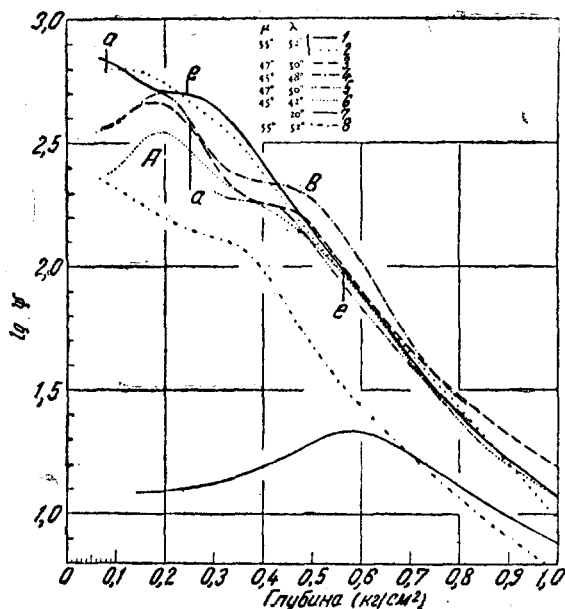


Рис. 7. Сравнение интенсивности космических лучей для вертикального направления. Горбы на кривых указывают наличие минимального пробега.

1. Комптон — Стефенсон — Милликен. 2. Боуэн — Милликен — Нигер. 3. Регенер — Гросс. 4. Рикар — Козис. 5. Кольгестер. 6. Боуэн — Милликен. 7. Клей. 8. Комптон — Стефенсон.

ящее время и не может быть проведено с достаточной точностью, тем не менее результаты показывают, что этот метод мог бы дать нам при известных обстоятельствах полный и надежный анализ первичных космических лучей. На рис. 7 приведены данные различных воздушных полетов; они обнаруживают наличие минимального пробега для лучей, проходящих через атмосферу.

Нанесенная по ординатам величина ψ представляет собой не непосредственно измеренную интенсивность космических лучей, идущих со всех сторон, а скорее интенсивность компоненты, которая проходит через атмосферу в вертикальном направлении. Эта компонента рассчитана по измеренной общей интенсивности с помощью

формулы, предложенной Гроссом. Недавно Регенер⁴² подтвердил анализ Гросса, произведя непосредственное измерение вертикальной компоненты с помощью счетчиков, работавших на совпадении. Нужно отметить, что для одной и той же эффективной магнитной широты μ полученные различными авторами кривые находятся в хорошем согласии друг с другом.

Горизонтальные участки приведенных кривых указывают минимальный пробег; если бы не существовало частиц с меньшими пробегами, чем этот предел, то ионизация не возрастала бы с дальнейшим увеличением высоты. На рисунке указаны также рассчитанные минимальные пробеги для электронов α -частиц, способных проникнуть через магнитное поле земли на этих широтах. Рассчитанный минимальный пробег для протонов слишком велик, чтобы поместиться на приводимой диаграмме. Все эти расчеты могут быть проведены лишь приближенно, главным образом, потому что мы не знаем точно потерю энергии различными частицами при прохождении их через материю. В дальнейшем будет видно, однако, что сравнение найденного минимального пробега с предсказываемым указывает, что наименее проникающая группа космических лучей состоит из α -частиц, более проникающая — из электронов. Наблюдения широтного эффекта на уровне моря дают аналогичное доказательство существования еще более проникающей группы, которая была отождествлена с протонами.

Детальный разбор этого сильного метода анализа был мной проведен в другом месте³⁸. Однако время не позволяет нам углубиться в его дальнейшее развитие. На основании данных, полученных в наших, а также и других экспериментах, мы можем прийти к следующему предварительному анализу. Основная часть наблюдаемых на уровне моря космических лучей состоит приблизительно из равного числа положительных и отрицательных электронов. На уровне моря и ниже имеется очень проникающая компонента, которую нужно, повидимому, принять состоящей из протонов; однако в этом последнем заключении имеются некоторые трудности. На очень больших высотах обнаруживается относительно сильно поглощаемая компонента, которая повидимому, состоит из α -частиц.

Наличие трех отдельных компонент космических лучей доказывалось измерениями интенсивности лучей на различных глубинах, считая от границы атмосферы. Рис. 7 показывает наличие двух компонент, которые мы назовем *A* и *B*. Компонента *A* играет важную роль лишь на очень больших высотах. Компонента *B* является той компонентой, которую мы идентифицировали, как состоящую из электронов. Данные для глубин, лежащих ниже уровня моря, всего лучше суммируются рис. 8, где указаны результаты проведенного Эккартом анализа коэффициентов поглощения космических лучей для высоты в 7000 фут., на основании измерений Регенера, Милликена и Бенеделя для больших глубин в воде. Наша компонента *A* на таких малых высотах не проявляется, но компонента *B* может быть отождествлена с мягкой компонентой, полученной Эккартом,

и обладающей средним коэффициентом поглощения 0,6 на 1 м воды. Его более проникающая компонента с коэффициентом поглощения приблизительно 0,08 согласно нашему предварительному анализу, состоит из протонов.

Дополнительные данные, подтверждающие этот анализ, можно получить из наблюдений Андерсона и других⁴³, показавших, что наблюдаемые в камерах Вильсона на уровне моря и на Пайк Пик частицы больших энергий представляют собой приблизительно равное число положительно и отрицательно заряженных частиц, с вероятным превышением положительных (на уровне моря). Эти измерения имели дело, главным образом, с той компонентой, которую мы обозначили через *B*, и они поэтому подтверждают тот факт, что она состоит из позитронов и электронов. Опыты Джонсона, Аль-

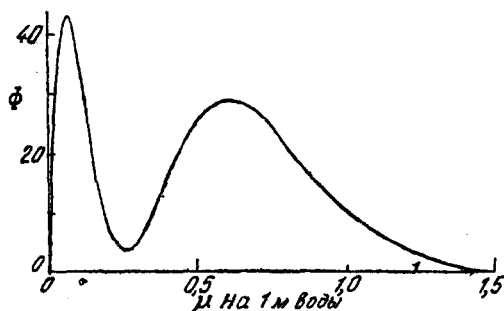


Рис. 8. Спектр коэффициента поглощения космических лучей на высоте ∞ 2000 м (по Эккерт).

верца, Росси* и других, в которых производилось исследование распределения космических лучей по направлениям, показали, что возле экватора частицы, вызывающие совпадения, идут главным образом, с запада, обнаруживая некоторый перевес в пользу положительных частиц, которые по всей вероятности, являются протонами; в то же время для первичных частиц, создающих ливни, имеет место симметричное распределение, хотя для них и наблюдается широтный эффект; они, вероятно, могут быть отождествлены с электронами и позитронами, встречающимися в равных количествах. Установленный Росси³⁸ и Джонсоном³⁷ факт, что относительное число ливней возрастает с высотой, подтверждает отождествление наиболее проникающей компоненты с протонами. Однако невозможность отождествления протонов очень больших энергий в исследованиях с помощью камеры Вильсона оставляет некоторые сомнения относительно состава этой наиболее проникающей части космических лучей.

* См. в особенности сноску³⁸.

Едва ли можно сомневаться в том, что продолжение исследования в том же направлении позволит произвести полный и точный анализ состава космических лучей.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ЭНЕРГИЯМ

Существует несколько методов измерения энергии частиц космических лучей, наиболее непосредственный из которых состоит в загибании путей частиц в магнитном поле электромагнита или земли. Наиболее плодотворные опыты для определения энергии частиц по отклонению их в магнитном поле электромагнита были проведены Андерсоном. В его установке между полюсами магнита

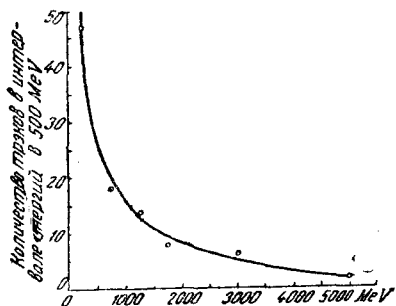


Рис. 9. Распределение по энергиям общего числа частиц космических лучей, наблюдаемых на уровне моря (Андерсон).

помещалась камера Вильсона, пускаемая в ход счетчиками по схеме Блеккета и Оккиалини. На рис. 9 приведена полученная Андерсоном кривая распределения по энергиям частиц космических лучей, наблюдаемых на уровне моря⁴⁴. Многие частицы, обладающие энергиями меньшими 10^9 eV, являются вторичными; для более высоких энергий большая часть из них являются первичными. Для энергий больших $5 \cdot 10^9$ eV этот метод, однако, ненадежен ввиду малой кривизны треков. Конечно, приведенная кривая дает энергии частиц после того как они прошли через атмосферу.

Исследование широтного эффекта дает нам магнитный анализ распределения частиц по энергиям, свободный от вопроса о том, являются частицы первичными или вторичными. Пока еще не опубликовано подробного распределения частиц по энергиям, полученного этим методом. Однако существование широтного эффекта на больших высотах вплоть до 55° означает, что имеются первичные частицы с энергиями около $2 \cdot 10^9$ eV (для электронов). В более высоких широтах, вероятно, существуют первичные частицы с еще меньшей энергией. С другой стороны, электрон, достигающий экватора в вертикальном направлении, должен иметь энергию около $20 \cdot 10^9$ V. Исследования распределения частиц по направлениям показывают, что на экваторе многие из них обладают еще большими энергиями. Из таких наблюдений можно утверждать с уверенностью, что встречаются первичные космические частицы с энергиями от $2 \cdot 10^9$ eV до больших, чем $60 \cdot 10^9$ eV.

Оценка энергии частиц по проникновению их на большие глубины и по энергии, освобождаемой при так называемых толч-

как Гофмана, менее надежна; тем не менее она согласуется по порядку величины с энергиями, найденными из исследования широтного эффекта. Эти методы показывают, что иногда встречаются космические частицы с энергиями, большими $600 \cdot 10^9 \text{eV}^{45}$.

ЭФФЕКТЫ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ

Известны два различных вида эффектов, вызываемых непосредственным действием первичных частиц космических лучей. Таковыми являются: 1) непосредственная ионизация атомов при столкновениях с электронами, как это происходит в случае β -лучей обыч-



Рис. 10. Ливень вторичных частиц космических лучей, вызванный неионизирующей частицей, вероятно, фотоном (Андерсон).

ных энергий, 2) ядерные столкновения, сопровождаемые испусканием фотонов, т. е. образованием γ -лучей. На рис. 6 мы видим пример ионизации первого вида. Доказательство образования фотонов от первичных лучей не является таким непосредственным. Рис. 10 показывает андерсоновскую фотографию ливня из электронов и позитронов больших энергий, созданного в свинце неионизирующей частицей. Из таких наблюдений можно заключить, что ливни вызываются непосредственно при поглощении фотонов. Однако в подобных экспериментах выяснилось, что фотоны сами возникают в непосредственной близости от аппаратов и сами являются поэтому вторичными лучами. Опыты Джонсона³⁷, выполненные методом совпадений, показали, что для ливней также наблюдается широтный эффект. Это должно означать, что они вызываются первичными электрически заряженными частицами космических лучей.

Исходя из этого, Гейгер и Фюнфер⁴⁶ установили пять градаций в космических лучах: *A* — первичный электрон или позитрон, приходящий из мирового пространства; *B* — фотоны, возбуждаемые

первичным электроном; C — электроны и позитроны, вызываемые поглощением этих фотонов; D — фотоны, вызываемые в свою очередь этими электронами; и, наконец, E — электронные пары, возникающие от таких фотонов. Эта сложная схема вторичных лучей, повидимому, подтверждается опытом Клея⁴⁷ со счетчиками, а также фотографиями, полученными с камерой Вильсона. Таким образом электрон с энергией порядка 10^{11} eV дает начало многим электронам с энергиями порядка 10^7 eV. Для энергий меньших 10^7 eV более вероятным по сравнению с образованием фотонов от электрона является потеря энергии непосредственно при столкновении электронов с атомами; по этой причине вторичные лучи с малыми энергиями встречаются сравнительно редко. Теперь кажется вероятным, что толчки Гофмана, наблюдаемые в космических лучах, представляют собой не что иное как это дробление энергии частицы, происходящее, главным образом, в газе ионизационной камеры.

Из того, что известно о поведении лучей малой энергии удивительным должен казаться тот факт, что для этих больших энергий вторичных космических лучей фотон поглощается много легче, чем электрон той же самой энергии.

Согласно новой теории Бете и Гейтлера⁴⁸ и Оппенгеймера⁴⁹ мы должны ожидать, что наибольшая доля энергии очень быстрых электронов тратится на возбуждение излучения торможения. Для протонов, с другой стороны, должна превышать часть, теряемая при столкновении их с электронами. В согласии с этой теорией опыты Росси³⁸ и Джонсона³⁷, проведенные на различных высотах методом совпадений, указывают на существование двух видов первичных частиц, одни из которых обладают большей эффективностью по созданию ливней, чем другие. Опыты Джонсона³⁷, проведенные для определения пространственного распределения космических лучей (с помощью счетчиков), также подтверждают ту точку зрения, что вызывающие ливни первичные частицы представляют собой в одинаковом количестве позитроны и электроны, в то время как частицы, не создающие ливней, несут положительный заряд и, по всей вероятности, являются протонами. Однако испытание этой теории образования торможения излучения от быстрых частиц показывает наличие существенного отклонения экспериментальных данных от теоретических, даваемых квантовой электродинамикой. До энергий в 70 MeV андерсоновские исследования потери энергии электронами, проходящими через вещество, обнаруживают хорошее согласие полученных данных с теорией Бете и Гейтлера (рис. 11).

Однако для больших энергий, где длина волны, соответствующая электрону, становится меньше радиуса электрона классической теории, потеря энергии много меньше, чем это предсказывает теория⁵⁰. В этой области очень больших энергий требуется новое видоизменение электродинамики, подобное изменению Лоренц Эйнштейна, которое расширило электродинамику в область больших скоростей. Если когда-нибудь такая улучшен-

ная теория будет создана, то космические лучи дадут нам инструмент, и, повидимому, единственный, годный для того, чтобы проверить эту теорию.

ГДЕ ВОЗНИКАЮТ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ?

Существование широтного эффекта показывает, что космические лучи возникают далеко за пределами земной атмосферы. Земное магнитное поле не достаточно велико для того, чтобы заметно загнуть какую-либо возникающую в пределах атмосферы радиацию, прежде чем она будет заторможена столкновениями с молекулами. Кроме того, как отметил Блеккет⁵¹, если бы космические лучи возникали в земной атмосфере, то вследствие загибающего действия земного магнитного поля на частицы, идущие наружу, большая интенсивность должна была бы наблюдаться на экваторе. Это противоположно тому, что наблюдается при широтном эффекте.

Было найдено, что если исключить отклоняющее действие земного поля, то космические лучи падают на землю почти однородно по всем направлениям. Вне земной атмосферы не удастся найти внутри нашей галактики изотропное распределение материи, где космические лучи могли бы возникать. С другой стороны, внегалактические туманности или само пространство могли бы удовлетворить условию сферической симметрии. Вычисления как Эддингтона, так и Леметра показали, что вероятным поглощением космических лучей при прохождении их через межзвездное пространство приблизительно со скоростью света в течение 10^{10} лет можно было бы вполне пренебречь. Однако, если бы эти лучи подвергались тому же самому смещению к красному концу, которое наблюдается для света далеких туманностей, то лучи, образовавшиеся на расстояниях порядка 10^{10} световых лет, достигли бы земли лишь с малой частью своей начальной энергии. Следовательно, если лучи возникают непрерывно, то их изотропное распределение указывает на то, что большая часть их появляется в далеких галактиках, или в далеком пространстве, расположенных на расстоянии между 10^9 — 10^{10} световых лет. Можно было бы допустить, как это сделал Леметр, что они образовались в момент, когда началось расширение вселенной, и с тех пор путешествуют через пространство.

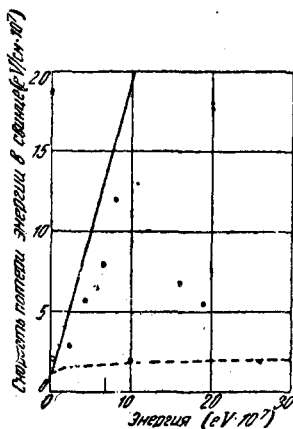


Рис. 11. Потеря энергии (отнесенная к 1 см) быстрым электроном при прохождении слоя свинца (экспериментальные данные по Андерсону, теоретические — по Бете и Гейтлеру).

Некоторым подтверждением для этой точки зрения о возникновении лучей на больших расстояниях от земли служит тот факт, что, повидимому, интенсивность космических лучей зависит от вращения галактики⁵².

Согласно Орта и других астрономов это вращение перемещает нас в направлении приблизительно 47° северной широты и 20 час. и 55 мин. прямого восхождения, со скоростью приблизительно 300 км в секунду — $1/1000$ скорости света. Если источник космических лучей находится за пределами нашей галактики и по-

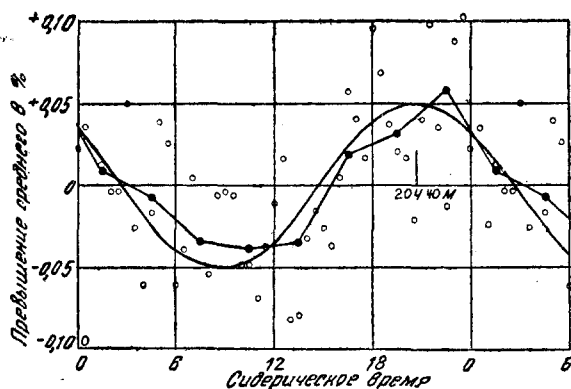


Рис. 12. Изменение интенсивности космических лучей со звездным временем (1932 г.). Данные Тесса и Штейнмаурера; теория, принимающая вращение галактики, — Комптона, Геттинга.

коится относительно ее центра тяжести, то, как показывает расчет, на нашей широте это движение должно вызывать суточный ход (по звездному времени) в интенсивности, величина которого порядка $0,1\%$. Наиболее подходящая запись интенсивности космических лучей, полученная Гессом и Штейнмаурером за 1932 г. (рис. 12), показывает наличие вариации интенсивности (с изменением звездного времени) ожидаемой величины и с максимумом, расположенным очень близко к предсказываемому времени. Хотя необходимы дальнейшие результаты прежде, чем будут исключены другие возможные интерпретации этой вариации интенсивности со звездным временем, тем не менее полное совпадение с предсказанным может оправдать предположение о том, что этот эффект действительно вызывается вращением галактики. Это должно приводить к заключению, что заметная часть лучей берет начало за пределами млечного пути, чем оправдывается название „космические“, имевшее раньше чисто эвристическое значение.

КАК ВОЗНИКАЮТ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ?

Из большого числа гипотез о происхождении космических лучей ни одна не получила достаточного экспериментального подтверждения для ее общего признания. Гипотезы, утверждающие, что космические лучи состоят из фотонов, находятся в явном противоречии с наблюдаемым широтным эффектом. Гипотезы, приписывающие происхождение космических лучей ядерным превращениям, протекающим с уменьшением их массы, не в состоянии объяснить наличие огромных энергий от 10^{10} до 10^{12} eV, которыми по новейшим исследованиям обладают космические лучи. Сванн представляет себе, что электроны ускоряются с помощью электромагнитной индукции, вызываемой меняющимися магнитными полями „солнечных пятен“ гигантских звезд. Мильн предполагает, что частицы приобретают свою энергию за счет гравитационного притяжения вселенной. Гипотеза Леметра состоит в том, что были созданы „сверхрадиоактивные частицы“ при начальном взрыве его расширяющейся вселенной. В настоящее время мы не можем подвергнуть экспериментальной проверке эти предположения.

Время не позволяет дискуссировать вопросы о применении космических лучей как инструмента для изучения других явлений. Достаточно сказать, что космические лучи по своей огромной энергии занимают в атомной артиллерии физиков место, не имеющее себе равного.

Наш анализ состава космических лучей продвигается вперед. Их космическое место происхождения, хотя возможно и не установлено, тем не менее кажется теперь более определенным, чем раньше. Их происхождение еще туманно; однако увеличивающееся знание их характеристик позволяет ограничить виды допустимых гипотез. Применяемые в виде действующего агента, космические лучи позволили открыть позитрон; они могут служить дополнением к телескопу для собирания астрономических данных; они дают средства к расширению наших знаний о законах электричества и свойствах материи для энергий, в тысячу раз больших тех, которые доступны нам от каких бы то ни было других известных источников.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. T. R. Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc., 11, 520, 1900; Proc. Roy. Soc., A 68, 151; A 69, 277, 1901.
2. H. Geitel, Phys. Z., 2, 116, 1900 — 1901; J. Elster a. H. Geitel, ibid., 2, 560, 1900 — 1901.
3. I. C. McClennan u. E. Burton, Physik. Z., 4, 533, 1902 — 1903; Phys. Rev., 16, 184, 1903.
4. E. Rutherford a. H. L. Cooke, Phys. Rev., 16, 183, 1903.
5. T. Wulf, Physik. Z., 10, 152, 1909, 11, 811, 1910.
6. A. Gockel, Physik. Z., 10, 152, 1909; 12, 595, 1911.

7. V. F. Hess, Wien. Ber., **120**, 1575; Physik. Z., **12**, 998, 1911; Wien. Ber., **122**, 1053, 1481, 1913.
8. V. F. Hess, Wien. Ber., **121**, 2001, 1912.
9. W. Kolhörster, Verh. d. Phys. Ges., **15**, 1111, 1913; **16**, 719, 1914.
10. G. Hoffmann, Physik. Z., **26**, 40, 669, 1925.
11. R. A. Millikan a. R. M. Otis, Phys. Rev., **23**, 778, 1924.
12. W. Kolhörster, Berlin. Ber., No 34, 1932; No 7, 1925.
13. R. A. Millikan, Proc. Nat. Acad. Sci., **18**, 38, 1926; R. A. Millikan a. G. H. Cameron, Phys. Rev., **28**, 851, 1926.
14. См. ссылку¹³ и Phys. Rev., **31**, 921; **32**, 533, 1928.
15. W. Bothe u. W. Kolhörster, Z. Physik, **56**, 751, 1929.
16. J. Clay, Proc. Acad. Sci. Amsterdam, **30**, 1115, 1927; **32**, 1091, 1928.
17. W. Bothe u. W. Kolhörster, Berlin Ber., No 26, 450, 1930.
18. R. A. Millikan a. G. H. Cameron, Phys. Rev., **31**, 163, 1928; R. A. Millikan, ibid., **36**, 1595, 1930.
19. Kerr Grant, Nature, **127**, 924, 1931.
20. J. Clay, Proc. Acad. Sci. Amsterdam, **33**, 711, 1930.
21. G. Hoffmann, Physik. Z., **32**, 633, 1932.
22. A. H. Compton, Phys. Rev., **41**, 111, 681, 1932; **43**, 387, 1933; Trans. Amer. Geophys. Union p. 154, 1933.
23. J. Clay a. H. P. Berlage, Naturwiss., **20**, 687, 1932; J. Clay. Physica, **1**, 363, 829, 1934; H. Hoerlin, Nature, **132**, 61, 1933; R. A. Millikan, Phys. Rev., **43**, 661, 1933; R. A. Millikan a. H. V. Neher, Phys. Rev., **47**, 205, 1935; J. Prins, Nature, **132**, 781, 1932.
24. См. R. A. Millikan, New-York Times, Dec. 31, 1932, p. 6.
25. I. S. Bowen, R. A. Millikan a. H. V. Neher, Phys. Rev., **44**, 248, 1933.
26. E. Regener, Physik. Z., **34**, 306, 1933.
27. A. Piccard a. M. Cosyns, C. R., **195**, 605, 1932.
28. J. Clay, Physica, **1**, 363, 1934.
29. A. H. Compton a. R. J. Stephenson, Phys. Rev., **45**, 441, 1934; I. S. Bowen, R. A. Millikan a. V. Neher, Phys. Rev., **46**, 641, 1934.
30. M. Cosyns, Nature, **135**, 313, 1935.
31. A. H. Compton a. R. J. Stephenson, Phys. Rev., **45**, 448, 1934.
32. T. H. Johnson a. J. C. Street, Phys. Rev., **43**, 381; T. H. Johnson, ibid., **43**, 834; **44**, 856, 1933; L. Alvarez a. A. H. Compton, ibid., **43**, 835, 1930; B. Rossi a. S. de Benedetti, ibid., **45**, 214, 1934.
33. B. Rossi, Z. physik. **68**, 64, 1931; **82**, 151, 1933.
34. D. S. Hsiung, Phys. Rev., **46**, 653, 1934.
35. P. Auger a. Ehrenfest, C. R., **199**, 1609, 1934.
36. U. C. Street, R. H. Woodward a. E. C. Stevenson, Phys. Rev., **47**, 891, 1935.
37. См. также T. H. Johnson, Phys. Rev., **47**, 318, 1935.
38. B. Rossi, International Conference on Physics, I Nuclear Physics, (London 1935), p. 233.
39. A. H. Compton a. R. I. Stephens, Phys. Rev., **45**, 441, 1934; A. H. Compton, Proc. Phys. Soc. London, **47**, 717, 1935.
40. C. Störmer, Z. Astrophys., **1**, 237, 1930; Oslo. Abos. Rub. N 10, 1934.
41. G. Lemaitre a. M. S. Vallarta, Phys. Rev., **43**, 87, 1933.
42. E. Regener, Nature, **136**, 718, 1935.
43. C. D. Anderson, Proc. Amer. Phys. Soc. Jan. 2, 1936.
44. C. D. Anderson, Intern. Conf. on Physics, I, Nuclear Physics (London 1935) p. 171.
45. См. также W. Kolhörster, Berlin., Ver., 686, 1933; F. Steinke, Ergeb. d. exakt. Naturwiss., **13**, 89, 1934; Compton, Nature, **134**, 1006, 1934.

46. H. Geiger u. Fünfer, Z. Physik, **93**, 543, 1935.
 47. J. Clay. Physica, **2**, 551, 1935.
 48. H. Bethe a. W. Heitler, Proc. Roy. Soc., A **146**, 83, 1934.
 49. I. R. Oppenheimer, Phys. Rev., **47**, 41, 1935.
 50. См. ссылки^{49,50} A. H. Compton, Proc. Phys. Soc. London, **47**
747, 1935, примечание 46.
 51. P. M. S. Blackett. La Radiation Cosmique Paris, 1935, p. 10.
 52. A. H. Compton a. J. A. Getting, Phys. Rev., **47**, 817, 1935.
-