
УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВОЕ О КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ ¹⁾

Р. А. Милликэн и Дж. Х. Кэмерон.

Под космическим излучением понимают ту малую часть „проникающего излучения“, которая имеет космическое происхождение. Главная цель этой статьи заключается в том, чтобы дать предварительный отчет о самой последней работе, которая проливает новый свет на свойства этих необыкновенных лучей и которая показывает, что существуют еще более жесткие лучи, нежели открытые передэтим, — именно лучи, обладающие способностью проникать 190 футов в воде или около 16,7 футов (5 м) в свинце, прежде чем быть совершенно поглощенными.

Так как еще недавно — всего только прошлым летом — некоторые из передовых физиков высказывали сомнение в самом существовании каких бы то ни было лучей, имеющих определенно космическое происхождение, и так как до настоящего момента некоторые наблюдатели, заслуживающие безусловного доверия, как, например, Сван ²⁾, Гофман ³⁾,

¹⁾ Эта статья представляет собой, с некоторыми изменениями, речь, произнесенную Милликэном на съезде Британской ассоциации в Лидсе 2 сентября 1927 г. *Nature, Suppl., Jan., 7, 1928, p. 19.*

²⁾ Сван (*Swann, Phys. Rev., 29, 372, 1927*) находит, что ионизация, вызванная такими лучами на вершине горы Пайк Пик, составляет 0,75 ионов в см³ в секунду, между тем как мы нашли в том же месте число, близкое к 5 ионам.

³⁾ Гофман (*Hoffman, Ann. d. Phys., 82, 413, 1927*) находит, что при допущении, основанном на открытии Кольгерстера (*Koehlerster.*

Кольгерстер и мы, в оценке интенсивности космического излучения, если оно существует, расходятся иногда в 8—10 раз, — то нашей первой задачей будет дать очень краткое изложение аргументации, имевшейся ко времени этих опытов, и затем посмотреть, как дополняются эти аргументы новыми данными.

Такой порядок изложения имеет еще и то преимущество, что он будет служить прекрасной иллюстрацией того медленного, шаг за шагом развивающегося процесса, при помощи которого наука двигается вперед. В этом процессе каждый экспериментатор основывается на прошлом и, если ему удастся, делает, по сравнению со своими предшественниками, небольшое движение вперед. Таким путем человечество в своем понимании природы почувствовало себя, наконец, на вершине могущества, не сознавая в то же время о тех отдельных моментах, в которых скрыты зачатки этого развития. Со времен греческой мифологии и до сих пор было сделано очень мало таких открытий, которые появились во весь рост в уме одного человека.

ПРЕЖНИЕ РАБОТЫ О КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ.

Начало изучению сильно „проницающих излучений“ вблизи земной поверхности было положено в 1903 г., когда эти лучи были обнаружены и названы так Мак Леннаном¹⁾, Резерфордом²⁾ и их сотрудниками, которые нашли, что скорость разряда электроскопа может быть значительно уменьшена, если окружить электроскоп целым рядом ширм из свинца во много сантиметров толщиной; таким образом было показано, что существующие в атмосфере лучи обладают спо-

ZS. f. Phys., 36, 147, 1926), согласно которому коэффициент абсорбции является величиной постоянной и что $\mu_{H_2O} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, ионизация на уровне моря составляет 0,29 в см^3 в секунду. С другой стороны, мы (Phys. Rev., 28, 851, 1926) нашли, что коэффициент абсорбции — величина переменная (т. е., что лучи неоднородные) и что ионизация на уровне моря составляет 1,4 иона.

¹⁾ Mc Lennan and Burton, Phys. Rev., 16, 184 (1903).

²⁾ Rutherford and Cooke, Phys. Rev., 16, 183 (1903).

способностью проникновения через такие толстые экраны, в соответствии с чем они и были названы „проникающим излучением“.

Следующий важный шаг был сделан швейцарским физиком Гоккелем¹⁾, который в 1910 году первый поднялся с защищенным электроскопом на воздушном шаре на высоту около 4500 м и нашел, вопреки ожиданию, что на этой высоте излучение значительно сильнее, чем у земной поверхности; этот факт сразу заставил признать, что если не все излучение, то по крайней мере часть его имеет вне-земное происхождение, и что достигает оно земной атмосферы сверху; эта мысль была высказана Ричардсоном²⁾ еще в 1906 г.

В течение следующих четырех лет Гесс³⁾ в Австрии и Кольгерстер⁴⁾ в Германии сделали новые полеты, подобные полету Гоккеля, проверили его результаты и большее внимание обратили на количественную сторону дела. Кольгерстер делал наблюдения до высоты поднятия в 9000 м и нашел, что скорость разряда медленно убывает приблизительно до 1000 м и затем возрастает, достигая на высоте 9000 м семикратного значения величины, наблюдаемой на земной поверхности, или, более точно, на 80 ионов больше, чем на поверхности, как это и указывает Кольгерстер в своей работе.

Война приостановила на время дальнейшие исследования, но осенью 1921 и весной 1922 г. Милликэн и Боуэн⁵⁾ сделали следующий шаг, пустивши воздушные шары с самопишущими электроскопами, причем была достигнута высота около 15500 м, т. е. более, чем девять десятых расстояния до верхних слоев атмосферы, если эту высоту оценивать по количеству оставшегося внизу воздуха. Эти полеты позволили проверить результаты, полученные европейскими на-

¹⁾ Gockel, Phys. ZS. 11, 230 (1910).

²⁾ O. W. Richardson, Nature, 73, 607 и 74, 55 (1906).

³⁾ Hess, Phys. ZS, 12, 998 (1911) и 13, 1084 (1912).

⁴⁾ Kolhörster, Phys. ZS, 14, 1153 (1913); Verh. d. Deutsch. Phys. Ges., July 30, 1914.

⁵⁾ Millikan and Bowen, Phys. Rev., 22, 198 (1923) и 27, 353 (1926).

блюдателями, и показали, что до этой высоты скорость разряда возрастает, хотя значения этой скорости, полученные при новых наблюдениях, оказались гораздо меньшими, чем вычисленные из прежних наблюдений до высоты в 9000 м; это показывает, что „проникающие лучи“, если они происходят откуда-то сверху, являются в действительности гораздо более проникающими, чем это считалось до сих пор. Но если лучи происходят сверху, то ионизация внутри герметически закрытого электроскопа должна возрастать по экспоненциальному закону, т. е. в геометрической прогрессии, с приближением к верхнему слою атмосферы, и эти подъемы на большую высоту имели и имеют теперь особенно большое значение. Они дают совершенно определенное и надежное представление о верхнем пределе коэффициента абсорбции лучей, попадающих в атмосферу, если только такие лучи действительно существуют.

Однако тот факт, что общий разряд электроскопов при этих полетах составлял только около одной четвертой того, что можно было ожидать в случае принятия коэффициентов абсорбции, вычисленных на основании гипотезы о космических лучах из данных Гесса и Кольгерстера, — этот факт указывает, что причина явления несколько иная. До самого последнего времени возрастающая скорость разряда с высотой была единственным явлением, на котором покоилась гипотеза относительно космического происхождения лучей. Однако возможны были и другие предположения, и они на самом деле высказывались; предполагалось, например, что некоторые радиоактивные частицы неизвестного происхождения являются распространенными в верхних областях атмосферы. Такое допущение можно было бы проверить непосредственно при помощи прямых измерений коэффициента абсорбции проникающих лучей скорее, чем при помощи попыток вычислить эти коэффициенты, как это делалось ранее, на основании допущения, что лучи входят в атмосферу сверху. Если бы лучи имели радиоактивное происхождение, то вряд ли они могли быть значительно более жесткими, чем лучи известных радиоактивных веществ, как, например, торий *D* или радий *C*.

Следующий шаг был сделан летом 1923 г., когда Кольгерстер¹⁾ в Европе и Милликэн и Отис²⁾ в Америке независимо друг от друга сделали первые прямые измерения абсорбции с иными материалами, чем атмосферный воздух, — первый в Альпийских ледниках и в мелких водоемах, лежащих на уровне моря, и последний в толстых свинцовых экранах на вершине горы Пайк Пик — все это с целью пролить свет на возможное происхождение проникающих лучей.

Кольгерстер в результате своих опытов в ледниках находит коэффициент абсорбции равным 0,25 на метр воды или приблизительно половине найденной ранее величины, т. е. 0,55, чем и исключается расхождение между величинами, найденными при его полетах и при наших опытах с воздушным шаром. В своей статье, посвященной описанию этой работы, он утверждает, что его опыты определенно указывают на существовании γ -лучей с коэффициентом абсорбции, составляющим около одной десятой коэффициента абсорбции самых жестких из известных γ -лучей (4,1 на 1 м воды³⁾), но с большой осторожностью говорит об их происхождении. После рассмотрения различных возможностей он говорит, что „в последнее время все более и более склоняются к мысли, что проникающие лучи представляют собой явление, происхождение которого следует искать в мировом пространстве⁴⁾“.

С другой стороны, Милликэн и Отис на основании своих новых данных об абсорбции на горе Пайк Пик заключили, что, если бы какие-либо из проникающих лучей, обнаруженных на горе Пик, имели космическое происхождение, они должны были бы быть более проникающими или

¹⁾ Kolhörster, Sitz. Ber. d. Preuss. Akad., 34, 366, Dec. 20 (1923).

²⁾ Millikan and Otis. Phys. Rev., 23, 778 (1924) и 28, 851 (1926).

³⁾ Kovarik and Mc Keehan, Radioactivity, Bull. Nat. Res. Council p. 114 (1925).

⁴⁾ „Neuerdings neigt man immer der Ansicht zu, die Höhenstrahlung als eine Erscheinung aufzufassen, deren Ursprung im Kosmos zu suchen ist“. И далее: „Da für die erstere Auffassung der Höhenstrahlung als einer aus den höheren Atmosphärenschichten stammenden bisher keinerlei direkte Andeutung gefunden wurde, so sprechen die augenblicklichen Verhältnisse mehr zugunsten einer kosmischen Erklärung“.

менее интенсивными, чем это соответствует даже уменьшенным величинам, найденным Кольгерстером, именно 2 иона на уровне моря и коэффициент абсорбции — 0,25 на 1 м воды. Средний коэффициент излучения, который они нашли на горе Пайк Пик, оказался лишь слегка меньшим, чем у тория *D*, и большая часть излучения имела, вероятно, местное происхождение. Они обнаружили в этих опытах новое свидетельство существования лучей космического происхождения. В самом деле, вплоть до 1925 г. ни в какой стране, как об этом можно судить по литературе, не чувствовалось уверенности в том, что существование лучей космического происхождения является доказанным. Возрастание ионизации в защищенных сосудах почти до 15 км было несомненным фактом, так что опыты Кольгерстера в ледниках были благоприятны для космического толкования; однако возможности загрязнений ледников радиоактивными веществами являются далеко не малыми, а также и сама неправильная форма ледников, равно как и их близость к земле, не годились для точной работы с измерениями коэффициентов абсорбции.

Дальше Гофман¹⁾ в Германии с его необыкновенно тонкой техникой высказался в 1925 г. против существования лучей космического происхождения. Сванн²⁾ в Америке также выступил с утверждением, что работы его самого и сотрудников, касающиеся ионизации в сосудах при давлениях до 75 атм., являются несовместимыми с космическим толкованием проникающего излучения.

НАБЛЮДЕНИЯ В ГОРНЫХ ОЗЕРАХ.

Однако в 1925 г. Милликэн и Кэмерон получили несомненное с их точки зрения доказательство, что проникающее излучение имеет космическое происхождение. Действительно, это излучение оказалось более слабым и более

¹⁾ Hoffmann, Phys. ZS, 26, 40, 669 (1925).

²⁾ Downey, Phys. Rev., 20, 186 (1922). Fruth, Phys. Rev., 22, 109 (1923).

проникающим, чем это следовало из предыдущих оценок: ионизирующая способность на уровне моря оказывается равной только 1,4 иона в 1 см^3 в сек., а коэффициент абсорбции становится равным всего лишь 0,18 на 1 м воды; это излучение имеет определенное спектральное распределение, причём наибольшие длины волн, вычисленные по формуле Комптона (А. Н. Compton), лежат около $\lambda = 0,00063 \text{ \AA}$, а наименьшие — около $\lambda = 0,00038 \text{ \AA}$. Последняя составляет всего лишь одну тридцатую длины волны самых жестких γ -лучей.

Эти опыты состояли в погружении изолированных электроскопов в глубокие, расположенные на больших высотах и окруженные снегом озера, причём в одном частном случае, в озере Мюр (высота 3590 м), было найдено, что ионизация постепенно убывает с глубиной, от 13,3 ионов в 1 см^3 в сек. на поверхности до 3,6 ионов на глубине 60 футов (18 м); ниже этой точки чувствительность употреблявшихся тогда инструментов не давала возможности проследить дальнейшего уменьшения ионизации. Таким образом здесь впервые определенно был получен на электроскопе нуль, т. е. влияние всех внешних излучений было вполне исключено, и результаты, следовательно, начали показывать, что будет вполне возможно с уверенностью делать определения абсолютного значения проникающей радиации.

Этот опыт, в той его части, которую мы пока описали, доказывает либо существование на поверхности озера проникающей радиации такой жесткости, что она оказывается способной проходить на глубину 18 м, прежде чем быть совершенно абсорбированной, — либо еще какое-то очень странное распределение радиоактивности в воде озера.

Вскоре вслед за этим, когда нам пришлось делать такие же наблюдения на другой глубине снежного озера, расположенного на 450 км южнее и на 2060 м ниже, мы получили такую же кривую, с той лишь разницей, что каждый отсчет соответствовал перемеще-

нию как раз на 6 футов вверх. Но 6 футов воды по своей абсорбционной способности, при условии, что закон абсорбции массами имеет силу, оказываются в точности эквивалентными слою атмосферы, лежащему между высотами 3590 м и 1530 м.

Этот опыт, дополненный другими подобными же открытиями, определенно доказывает, таким образом, три положения.

Первое — это то, что эффект на озере Мюр не является зависящим от какой-либо радиоактивности, которая распределена в воде каким-то особым образом. Второе — это то, что источник лучей вовсе не находится в слое атмосферы между двумя высотами, ибо этот слой действует как абсорбционная среда, имеющая в точности ту абсорбцию, какая должна была бы быть в том случае, когда лучи целиком идут сверху. И наконец третье — это то, что в различных местностях, отстоящих друг от друга на 450 км, лучи действуют совершенно одинаково на одних и тех же высотах.

Эти факты, вместе с дальнейшими наблюдениями, сделанными до и после этого, показавшие, что в пределах наших ошибок опыта лучи попадают сюда в равной степени из всех направлений от неба, и дополненные наконец тем обстоятельством, что наблюдаемый коэффициент абсорбции и общая ионизация под действием космических лучей на высоте озера Мюр удовлетворительно предсказывают те результаты, которые были получены при полете воздушного шара на высоту 15,5 км, — все это составляет прекрасное и бесспорное доказательство, что эти лучи не происходят из нашей атмосферы, во всяком случае из слоев ниже девяти десятых ее, и поэтому с полным правом могут быть называемы „космическими лучами“ — этим наиболее описательным и наиболее подходящим именем, придуманным для той части лучей, которые попадают сюда с неба. Мы рассмотрим, насколько бесспорным представится доказательство после того, как будут изложены наши новые результаты.

Эти результаты получены из двух групп опытов, одна из которых была проделана на Андских горах в Боливии на высотах 4600 м осенью 1926 г. и другая — в озерах Арроухид и Джем в Калифорнии летом 1927 г.

Проницающее излучение на Андских горах.

Опыты на Андских горах преследовали четыре главных цели: 1) Посмотреть, будут ли совпадать друг с другом кривые зависимости ионизации от высоты, полученные в озерах южного и северного полушарий. Эти кривые были особенно чувствительны в очень высоко расположенных озерах, достижимых в Андских горах, так что спектральное распределение могло быть исследовано более тщательно, чем в 1925 г. Если бы кривые северного и южного полушарий совпадали, то тем самым были бы получены весьма важные данные против предположения о возможности возникновения проникающих лучей под действием быстрых β -лучей на самые верхние слои нашей атмосферы, т. е. ту единственную гипотезу, которая видит источник этих лучей в последней десятой части воздуха, окружающего землю. Для таких β -лучей можно было бы ожидать влияние земного магнитного поля, так что над полюсами должно бы быть более сильное излучение, чем над экватором. На 17° южн. широты мы были бы вполне защищены от такого полярного влияния, особенно если бы мы могли поместиться в подходящих впадинах на высоких горах. 2) Чтобы подвергнуть проверке гипотезу Вильсона (C. T. R. Wilson), согласно которой эти лучи возникают благодаря воздействию на атмосферу земли электронов, обладающих скоростями во много миллионов вольт и образующихся во время гроз. Озера, расположенные в соответствующих впадинах на Андских горах, были бы вполне защищены от подобных влияний. Точно так же сравнение лучей, наблюдаемых в грозных местностях, с лучами, наблюдаемыми в обширных областях, подобных Калифорнии, которые являются сравнительно свободными от грозных явлений, могло бы доставить поверочные данные на этот счет. 3) Чтобы при определении,

как было указано выше, нулевых положений новых электро-скопов получить новые данные для проверки полученной нами величины ионизации, которая вызывается космическими лучами на уровне моря; эта величина до сего времени все еще колеблется в широких пределах в результатах различных наблюдателей. 4) Чтобы поместиться в соответствующих впадинах или долинах на очень высоких горах, где лучи в три или четыре раза более интенсивны, чем на уровне моря, и чтобы проделать там более надежные опыты над непосредственным действием космических лучей — в частности посмотреть, не является ли Млечный путь более или менее эффективным в посылке этих лучей на землю, чем другие части неба.

На все эти четыре пункта мы получили, несмотря на несчастные случаи с двумя электроскопами, удовлетворительный и определенный ответ.

Что касается (1), то мы получили на поверхности озера Титикака (выс. 3 822 м) данные, очень соответствующие результатам, полученным на озере Мюр в Калифорнии. Точно так же и на озере Мигвилла вблизи Караколеса в Боливии (выс. 4 500 м), мы получили данные, которые удовлетворительно укладываются на экстраполированную кривую для озера Мюр. Таким образом, если на кривых зависимости ионизации от высоты и имеются какие-либо различия, зависящие от географического положения, то они остаются за пределами нашей настоящей наблюдательной техники.

Что касается (2), то озеро Мигвилла является маленьким озером, со всех сторон окруженным горами, имеющими по несколько тысяч футов высоты. Оно, повидимому, вполне защищено от лучей, имеющих происхождение от гроз, где-либо на земле. Далее мы предприняли вдали от берегов Центральной Америки длинный ряд наблюдений в помещении для радиотелеграфа на корабле в одну из ночей, когда вдоль берега происходили вспышки молнии, сравнили эти результаты с наблюдениями, сделанные на калифорнийском берегу, который является почти совершенно свободным от гроз, и не обнаружили при этом ни малейших различий.

Таким образом гипотеза Вильсона является совершенно определенно исключенной.

По (3) мы определили нулевые положения двух наших электроскопов, опуская их на достаточную глубину, и затем на корабле проделали тщательные наблюдения на уровне моря на всех путях от Моллендо и Перу до Лос Анежелса. Мы не нашли в отсчетах на уровне моря никаких изменений с географическим положением, и обнаружили только незначительные различия между ионизациями в различных инструментах, хотя, они имели стенки из различного материала и их объемы относились почти как 1:2. Средняя величина ионизации на уровне моря, таким образом непосредственно наблюдаемая, оказалась только на несколько десятых иона выше средней величины ионизации на уровне моря под действием космических лучей, полученной при помощи двух кривых нашего предыдущего отсчета. Эти значения были: 1,4 для электроскопа № 1, 1,6 для электроскопа № 3 и 1,5 — средняя величина, которая является, таким образом, приблизительно проверенной, хотя все еще неточно (см. ниже), так как ионизация благодаря радиоактивным веществам в воздухе над океаном должна быть очень малой. Главная недостоверность в этой величине 1,5 для ионизации на уровне моря лежала в определении емкостей электроскопов и в неизвестности влияния стенок электроскопов. О последнем влиянии мы дадим отчет далее.

Что касается (4), то мы предприняли два ряда длинных наблюдений, каждое из которых продолжалось по три дня, на высоте 15 400 футов (4 620 м) в глубокой долине, из которой Млечный путь был виден в течение 5—6 часов и затем скрывался из поля зрения на следующие 6 часов. Интенсивность космических лучей, которые попадали в наши электроскопы в этой долине, была равна 3,6. Мы не могли открыть совсем никакой разницы в наших отсчетах как в то время, когда Млечный путь находился над головой, так и в том случае, когда он был не виден. Наша ошибка в средних величинах этих отсчетов едва ли могла быть более, чем 0,1 иона.

Даже в том случае, если бы мы делали вдвое большую ошибку, мы могли бы заключить в конце концов, что Млечный путь не оказывает на космические лучи такого влияния, которое наши инструменты могли бы в настоящее время открыть. А это означает, что лучи, идущие от Млечного пути, по своей интенсивности не будут отличаться больше чем на 6 % от интенсивности лучей, идущих с той части неба, которая находится под прямым углом к Млечному пути. Это находится в согласии с нашими прежними менее точными измерениями, а также и с недавней весьма тщательной работой на уровне моря Гофмана и Штейнке¹⁾, которые совсем не нашли никакого влияния направления на космические лучи; но это не согласуется с результатами, которые были сообщены Бюттнером²⁾ и Кольгерстером³⁾.

Как бы то ни было, но настоящая работа была сделана при таких благоприятных условиях, какие только были возможны. Представлялось чрезвычайно важным получить бесспорные данные относительно направления космических лучей, ибо нельзя было сделать никакого достоверного заключения о происхождении лучей до тех пор, пока не найдено место, откуда лучи исходят. До сих пор это место установлено не было, так что в близком будущем предстояло сделать более чувствительные опыты на этот счет.

Наблюдения в горных озерах в Калифорнии.

Предметом новой группы опытов в озерах Арроухид и Джем, начатых в начале 1927 г., было повторение опытов с еще более чувствительными электроскопами и увеличение точности определения констант электроскопов, так, чтобы можно было внести большую точность в работу с космическими лучами и всю задачу поставить на более строгий количественный базис.

¹⁾ Steinke, ZS. f. Phys. 42, 570 (1927).

²⁾ Büttner, ZS. f. Geophys., 2, 190 (1926).

³⁾ Kolhörster, Naturwissenschaften, 14, 936 (1926).

Как было указано ранее, различные наблюдатели были все еще далеки от того, чтобы знать абсолютную величину ионизации, хотя значительная группа среди нас находит, что ионизация на уровне моря лежит между одним и двумя ионами. Однако едва ли это можно назвать количественным согласием. Впрочем его и нельзя было ожидать, так как никакие наблюдатели, кроме нас, до сих пор не были в состоянии определить нулевое положение их инструментов, так что все величины ионизации, кроме наших, можно считать скорее оценками, чем измерениями. Далее, в наших собственных величинах возможна была ошибка на 10% — а может быть и меньше — в определении емкостей электроскопов.

Что касается до средних коэффициентов абсорбции, то между величинами Кольгерстера и нашими существует теперь известное согласие, но, кроме нас, никем не была обнаружена неоднородность лучей, хотя последние результаты Гофмана и Штейнке приводят их к подтверждению наших открытий и к предположению, что в смеси космических лучей могут существовать даже более жесткие лучи, нежели обнаруженные нами. Мы нашли, что последние имеют коэффициент абсорбции равный 0,18 на 1 м воды, что соответствует — если для вычисления пользоваться уравнениями Комптона — длине волны $0,00038 \text{ \AA}$ или потенциалу 32 600 000 V. Гофман¹⁾ для объяснения своих последних наблюдений на уровне моря допускает существование компонент, соответствующих длине волны, вычисленной таким же путем, $0,00029 \text{ \AA}$ или потенциалу 41 000 000 V.

С целью более точного определения интенсивностей космических лучей и более отчетливого изучения их спектрального распределения, мы начали осенью 1926 г. строить новые электроскопы с гораздо большей чувствительностью к космическим лучам; мы хотели, в частности, сделать испытания на существование еще более жестких лучей, чем те, которые можно было обнаружить нашими инстру-

¹⁾ Hoffmann, Ann. d. Phys., 82, 417 (1927).

ментами прежней чувствительности; подозревать же существование еще более жестких лучей мы могли на основании теоретических соображений. Эти электроскопы будут детально описаны в другом месте. Достаточно будет сказать здесь, что мы можем теперь измерять емкости наших электроскопов до нескольких тысячных (число 0,791 электростатических единиц представляет собой емкость инструмента, с которым мы получили приводимые ниже результаты) и что чувствительность электроскопов к космическим лучам теперь удалось повысить в восемь раз по сравнению с электроскопами, которые мы до сих пор употребляли; так, например, на уровне моря мы получили с нашим электроскопом 11 ионов, вызванных космическими лучами, вместо 1,4, и на озере Мюр — 40 вместо 5.

В опытах с таким электроскопом, которые мы вели прошлым летом на озере Джем, ионизация у поверхности озера была 33,6 в 1 см³ в сек. и убывала с глубиной регулярно и совершенно плавно до нулевого значения 2,6. Но это асимптотическое значение кривой зависимости ионизации от глубины было достигнуто лишь на глубине 50 м вместо тех 16,2 м, которые получились в наших предыдущих опытах на горе Арроухид в 1925 г. Это не надо понимать как разногласие между двумя группами результатов; это означает только, что ординаты ионизационной кривой теперь увеличились в 8 раз благодаря повышению чувствительности. Несмотря на это, точки, выражающие зависимость ионизации от глубины и полученные при помощи нового электроскопа, гораздо лучше укладываются на кривой, т. е. являются менее разбросанными, чем это было в предыдущем случае.

Таким образом, благодаря усовершенствованию техники, действительная чувствительность оказалась увеличенной значительно более, чем в 8 раз. Следовательно, только благодаря этой повышенной чувствительности и точности измерений теперь ясно стала заметна та ионизация в слое воды между 16 м и 57 м, которая раньше была скрыта от наблюдений.

Если принять во внимание абсорбцию лучей атмосферой, расположенной над озером Джем и эквивалентной 7,45 м воды, то можно сказать, что новыми опытами обнаружены лучи, обладающие способностью проникновения через 57 м воды или 5 м свинца, прежде чем быть совершенно поглощенными.

Новую кривую можно было анализировать для изучения спектрального распределения гораздо более надежно, чем в предыдущем случае. При этом мы с большим удовлетворением могли констатировать, что в результате анализа по прежнему методу часть излучения, исследованная на возвышенности Арроухид, имеет в точности такой же коэффициент, какой получился в той же области из предыдущей кривой, именно 0,23 на 1 м воды; нижняя же часть кривой приводит к коэффициенту 0,1 на 1 м воды, так что этим самым мы обнаружили лучи почти вдвое более проникающие, чем те, которые были найдены нами раньше. Вычисляя попрежнему, мы находим, что самая короткая длина волны теперь будет $0,00021 \text{ \AA}$, а эквивалентный ей ускоряющий потенциал — 59 000 000 V, что значительно превышает оценку, сделанную Гофманом.

Наша общая кривая простирается теперь от коэффициента абсорбции $\mu=0,25$ на 1 м воды до $\mu=0,1$ или в эквивалентных длинах волн, вычисленных, как и ранее, от $0,00053 \text{ \AA}$ до $0,00021 \text{ \AA}$, что соответствует интервалу от одной до двух октав. Если вычисления делать по формуле Дирака¹⁾, которая, вероятно, является более достоверной, чем формула Комптона, то относительные величины не изменяются, но абсолютные частоты или энергии возрастают на 30%.

Ионизация космическими лучами на уровне моря в этом электрооскопе, приведенная к атмосферному давлению, является той же самой,

¹⁾ Dirac, Proc. Roy. Soc., 109, 206 (1925).

какая была опубликована для электроскопа № 1, именно близка к $1,4$ иона в см^3 в сек., и ошибка, которая может здесь быть, для этого электроскопа будет меньше 1% .

Источники космических лучей.

Что же можно теперь сказать относительно возможного источника этих необыкновенных лучей? Одна их проникающая способность или частота, вычисленная по какой бы то ни было формуле, очевидно, требует, чтобы лучи были связаны с изменениями, имеющими место внутри самого ядра, так как никакие заряды, расположенные вне ядра, не могут быть связаны энергиями подобной величины. Простейшей гипотезой будет та, на которую мы обратили внимание в статье 1925 г., именно, что эти лучи возникают благодаря непосредственным столкновениям между атомными ядрами и электронами с высокими скоростями. Правда, в случае легких атомов, простой потенциальной энергии отделения электрона от ядра без большего исчезновения массы, чем это до сих пор предполагалось, будет недостаточно для создания лучей подобной жесткости.

Надо принять во внимание, что наиболее сильные из открытых ранее лучей очень близко соответствуют изменению энергии — потере массы, — сопровождающему соединению четырех атомов водорода в один атом гелия, но новые измерения дают лучи практически с вдвое большей энергией, чем эта, и только с $\frac{1}{15}$ той энергии, которую можно было бы получить при полном превращении в излучение энергию разделения положительных и отрицательных электронов, так что, повидимому, нет прямых экспериментальных оснований для предположения, что этим последним образом происходит уничтожение массы.

Если, тем не менее, во вселенной являются широко распространенными процессы, при которых электроны оказываются наделенными энергией во много миллионов вольт (в качестве такого процесса Вильсон называет грозвые

явления на земле), то будет не трудно представить себе, что столкновения таких электронов с ядрами атомов, как бы легки они ни были, будет действовать как источник наблюдаемых лучей. Мы не будем здесь пытаться перечислять возможные причины возникновения электронов с такими высокими скоростями, но, если мы постулируем их существование, то за этим сразу последует и существование космических лучей. В самом деле, из лучших спектроскопических наблюдений астрономы считают теперь, что междузвездное пространство населено не менее, чем одним атомом в каждом кубическом дюйме. Кроме того, из ионизированного состояния атомов кальция, которые были найдены в междузвездном пространстве, Эддингтон¹⁾, при помощи определения кинетической энергии находящихся в этом пространстве атомов и электронов, оценивает температуру пространства в $15\,000^{\circ}\text{C}$, т. е. получается большая величина, чем поверхностная температура солнца и большинства звезд.

Никаких излучений рассматриваемого здесь типа, если они возникают внутри звезд, также невозможно представить, так как они следуют закону абсорбции массами и, согласно предыдущим опытам, целиком абсорбируются в слое воды толщиной в 190 футов. Эту толщину лучи должны пройти множество раз, прежде чем они достигнут наружной оболочки звезды. Масса, эквивалентная такой толщине, будет пронизана лучами, прошедшими в любом направлении расстояние, равное 10^9 световым годам, при допущении, что пространство является усеянным атомами по одному в кубическом дюйме. Если эти рассуждения правильны, то это показывает, что направления к солнцу и звездам, вероятно, не отличаются от других направлений, как источники этих лучей, и все наблюдатели сходятся на том, что по крайней мере в случае солнца его направление будет безразличным.

Если, однако, постулировать электроны с высокими скоростями, как источник этих лучей, то почему бы не допустить, что эти электроны с высокими скоростями сами и

¹⁾ Eddington, „Stars and Atoms“, p. 69 (Oxford Press, 1927).

есть эти лучи? Как допустить существование коротких эфирных волн вообще? Ответ будет таков, что, как мы знаем из опыта, в фотоэлектрическом процессе имеет место обмен энергии между эфирными волнами и электронами без потери ее. Равным образом, согласно данным Эллиса (Ellis), эти квантовые законы будут иметь место совершенно так же внутри ядра, как и во внешней структуре атома. Напротив, превращение энергии в теплоту имеет место главным образом тогда, когда энергия связана с движущимся электроном. Другими словами, коэффициент абсорбции β -лучей будет в 100 и более раз выше, чем коэффициент абсорбции эфирных волн, имеющих ту же самую энергию. Таким образом электроны, пришедшие в движение посредством процесса Комптона или как-либо иначе, очень быстро рассеивают сообщенную им энергию, а потому перенос энергии через пространство в концентрированной форме (которая соответствует высокой проникающей способности) должен иметь место, когда она является в форме эфирных волн.

Следовательно, совершенно бесполезно предполагать, что источником наблюдаемых лучей является бомбардировка воздуха во внешней десятой части атмосферы электронами с высокой скоростью и той же самой максимальной энергией. Если электроны с такими большими скоростями могли бы попасть в верхний слой нашей атмосферы в достаточном количестве, то они действительно произвели бы как раз такие лучи, какие мы наблюдаем; но трудность заключается в том, каким образом эти электроны могли бы дойти к нам из пространства.

Так что скорее эфирные волны с их высокой проникающей способностью, чем электроны с высокими скоростями и сравнительно малой проникающей способностью, достигли бы нашей атмосферы в достаточном количестве. Это возражение было бы недействительным только в том случае, когда электроны с высокими скоростями возникали бы сравнительно близко от нас, например, на солнце или на близких звездах, и, следовательно, расстояние было бы недостаточно велико, чтобы их энергия была рассеяна в виде тепла или преобразована в более проникающие лучи.

Но этот последний случай в точности является тем самым случаем, который был исключен, так как мы не могли обнаружить сколько-нибудь заметное влияние солнца на интенсивность этого излучения.

Ибо, если бы направление к солнцу отличалось от другого направления на небе, как направление, в котором β -лучи высокой скорости были бы в избытке, то, по необходимости, это было бы также направление, в котором космические лучи возникали бы в аномальном избытке. Таким образом, согласно этой теории происхождения космических лучей, совершенно невозможно ограничивать источник этих лучей верхней десятой частью нашей атмосферы или астрономически близкими областями.

КОСМИЧЕСКОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ.

Предыдущие рассуждения относительно того расстояния от земли, на котором лучи происходят, с еще большей силой применимо ко всякой гипотезе, предполагающей либо самопроизвольное, либо вызванное извне изменение ядра, не связанное с ударами электронов; ибо материя в верхней десятой части нашей атмосферы должна, по всякой такой гипотезе, быть наделена свойствами, совершенно не похожими на те, которыми обладает материя, непосредственно нас окружающая.

Но пока материю в отдаленных областях вселенной можно представлять, наделенной такими свойствами, которые не обнаруживаются на земле, — было бы нарушением принципа минимума гипотез принимать, что тонкое кольцо материи, находящееся как раз за пределами материи непосредственно нас окружающей, имеет свойства, которыми не обладает материя ни более удаленная, ни более близкая. Следовательно, мы не видим возможного пути для того, чтобы приписать лучам иное происхождение, чем космическое; но если Млечный путь, как источник лучей, не отличается от других частей неба (и наши опыты, на самом деле оказались не в состоянии заметить такое отличие), то тогда лучи должны исходить из областей, рас-

положенных за Млечным путем, т. е. либо от спиральных туманностей, если они являются равномерно распределенными по небу, либо от звездных скоплений.

Из результатов наших опытов 1927 г. мы можем теперь вычислить на первое время с достаточной степенью уверенности общую энергию на 1 см^2 в сек., которая попадает на верхнюю часть земной атмосферы в форме космических лучей. Получается $3,1 \cdot 10^{-4} \text{ эрг см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$, или как раз одна десятая общей энергии, попадающей в земную атмосферу в форме видимого и теплового излучения звезд.
